

# **Habilitation Universitaire**

**Par** :Dr. Rachid NEBBALI

**Thème** : Utilisation des Fluides Non-Newtoniens et des Milieux Poreux pour l'Amélioration du Transfert de Chaleur

## **I. INTRODUCTION**

Ce rapport scientifique est une synthèse de mes activités de recherche et pédagogiques que j'ai entreprises sur la période s'étalant de 1992 jusqu'à cette année. J'ai entamé mes travaux de recherches en tant qu'étudiant en post-graduation pour la préparation d'un Magister à l'institut de Génie Mécanique de l'USTHB de 1992 à 1995. Après mon recrutement, en 1998, en tant que maître assistant à l'USTHB, j'ai entamé une deuxième étape dans mes travaux de recherche, en tant qu'enseignant chercheur, avec mon inscription en doctorat. Ces travaux ont été conduits au LTP et au laboratoire des transports polyphasiques et milieux poreux de la faculté de génie mécanique et de génie des procédés de l'USTHB. Mes contributions dans quatre projets de recherche, agréés par le MESRS, m'ont permis d'évoluer en tant que chercheur associé puis chargé de recherche. Après la soutenance de ma thèse de doctorat es, sciences j'ai obtenu le grade de maître de conférences B qui me permet, aujourd'hui, de postuler pour l'habilitation universitaire en génie mécanique.

L'un des plus grands défis au quel est confronté l'humanité est la disponibilité sans interruption de l'énergie sous toutes ses formes ; en effet, c'est le moteur principal de l'économie mondiale. Le système énergétique mondial est bâti sur des ressources primaires tarissables aux quelles il faut trouver des solutions palliatives. De plus, d'autres considérations se sont greffées à l'épuisement des ressources fossiles telles que la préservation de l'environnement et les problèmes de sécurités comme la récente crise de la centrale Nucléaire de Fukushima. Les solutions de substitution existent, cependant certaines sont pas (compétitives technologie coûteuses, rendement) alors que d'autres présentent des problèmes de sécurité comme le nucléaire. La préservation des ressources primaires par une meilleure efficacité des systèmes énergétiques et la rationalisation de l'énergie est une voie

intermédiaire qui peut repousser les échéances du tarissement des ressources fossiles en attendant les énergies de substitution.

Lors de la préparation de ce rapport, une question importante s'est très vite imposée à moi et à la quelle je devais trouver une réponse : sous quel thème ou titre présente ce rapport. En examinant les travaux que j'ai entrepris à partir de mon magister et même de mon projet de fin d'étude d'ingénieur, j'ai constaté qu'on peut tous les liés au problème énergétique décrit plus haut. Ainsi, pour mon diplôme d'ingénieur j'ai présenté un mémoire traitant du dimensionnement d'un système de récupération d'énergie des gaz d'échappement des engins de travaux publics. Pour mon magister j'ai présenté un travail traitant du remplacement des réfrigérants CFC par les HCFC dans un souci de préservation de l'environnement. Enfin, dans mon doctorat j'ai réalisé un travail de recherche sur l'amélioration du transfert de chaleur en utilisant des fluides non-Newtoniens et des milieux poreux dans des conduites de différentes section. Ce travail, présente un intérêt du fait que l'amélioration du transfert de chaleur s'accompagne par une meilleure efficacité énergétique des systèmes thermiques.

En tant que première expérience, le dimensionnement d'une installation thermique de récupération d'énergie pour les engins de TP fut une expérience enrichissante, elle m'a permis d'étendre les connaissances acquises lors de ma formation. Dans ce travail, on avait à dimensionner une petite installation fonctionnant selon le cycle de Rankine qui utilisait l'énergie des gaz d'échappements comme source de chaleur dans le générateur de vapeur. De ce fait, on a pu s'initier aux techniques de dimensionnement des échangeurs de chaleur, des évaporateurs, des condenseurs et des turbines à vapeur. En outre, çam'a permis de prendre la mesure des difficultés rencontrées et contraintes posées par ce type d'installations comme l'encombrement réduit. A l'époque en tant qu'étudiant en fin de formation, notre vue sur le projet était superficielle et se réduisait uniquement en un dimensionnement. Cependant, avec du recul et l'expérience acquise au fil des ans, je vois tout l'intérêt que présentait ce travail, qui, déjà, à l'époque abordais le problème de l'efficacité l'énergétique et tentais d'apporter une modeste contribution dans ce sens dans un secteur gourmand en énergie et fortement pollueur.

En 1992, j'ai entamé des études en première post-graduation avec mon inscription dans le Magister intitulé : Systèmes thermiques industriels au département thermo énergétique de l'institut de Génie Mécanique de l'USTHB. Après l'année théorique, j'ai commencé mon

initiation à la recherche en faisant une investigation sur la substitution des réfrigérants (CFC) par les réfrigérants HCFC et HFC. Ce thème faisait partie d'un projet de recherche initié par l'équipe du Prof. K. Bouhadeb à la suite de la ratification par l'Algérie du protocole de Montréal 1987 dont le but était la lutte contre la destruction de la couche d'ozone. Dans ce travail, j'ai présenté une analyse thermodynamique du cycle à compression de vapeur de la machine frigorifique en étudiant ses performances en utilisant trois réfrigérants différents : R12(CFC), R22(HCFC) et le R134a(HFC). A cet effet, une approche basée sur le second principe de la thermodynamique a été utilisée en parallèle avec une approche basée sur le premier principe de la thermodynamique. L'introduction de l'exergie dans l'analyse a permis de définir de vrais rendements en définissant le travail maximal qui peut être produit à partir d'une certaine quantité de chaleur contrairement au COP où aucune distinction n'est faite entre le travail et la chaleur.

Depuis mon inscription en doctorat des sciences, j'ai part à trois projets de recherche au niveau du LTPMP. Tout d'abord en tant que doctorant jusqu'à ma soutenance de ma thèse de doctorat en Mars 2009 ensuite en tant que maître de conférence B.

Le premier projet de recherche s'est étalé de 2001 à 2003 et a abordé le problème des phénomènes de transports dans des systèmes présentant des milieux poreux ou fibreux. L'intérêt de projet réside dans l'existence et l'importance des milieux poreux, fibreux ou composites, dans de nombreux systèmes technologiques, domestiques ou industriels. On citera l'hydrogéologie, le génie pétrolier, le génie chimique, le génie thermique, la médecine, la pharmacologie, l'environnement, l'industrie des textiles et des fibres à papier, ainsi que l'industrie automobile (catalyseurs hétérogènes). La structure ramifiée de ces milieux, ainsi que leurs formes, tailles, natures et propriétés physico-chimiques, sont d'une grande importance pour l'étude de leur comportement, lorsqu'ils sont le siège d'un processus de transport donné. Ce dernier peut être dynamique, thermique ou massique. Ma participation à ce projet de recherche, m'a permis d'acquérir une certaine expérience sur la méthodologie employée dans la conduite d'un travail d'investigation scientifique en me frottant à des chercheurs confirmés ayant acquis un savoir faire important dans ce domaine.

Dans le deuxième projet de recherche qui s'est étalé de Janvier 2004 sur une période de trois années, a porté sur l'étude des transferts dans des systèmes à géométrie complexe poreux ou non poreux, ma contribution concernait l'apport des fluides non newtoniens. J'ai ainsi

conduit une investigation sur le transfert de chaleur dans une conduite 3D à section rectangulaire partiellement poreuse. Le choix de cette géométrie est motivé par sa présence dans divers processus et systèmes industriels comme les échangeurs de chaleur. Parmi les résultats obtenus, il ressort qu'il existe des conditions pour les quelles une amélioration du transfert de chaleur peut être obtenu par rapport au cas sans milieu poreux tout en maintenant les pertes de charges à un seuil acceptable par rapport au cas totalement poreux. Ces conditions dépendent, des propriétés thermophysiques de la matrice poreuse et du fluide non-Newtonien en particulier la perméabilité et la conductivité thermique.

Un troisième projet de recherche a été initié par le Professeur K. Bouhadeh et s'est intéressé à la caractérisation et optimisation de systèmes thermiques contenant des milieux poreux. Ce projet constituait une suite au projet précédent vu les résultats encourageant obtenus et au potentiel d'investigation qu'il offrait. Ma contribution dans ce projet a porté sur deux aspects :

1. Analyser l'effet de la géométrie sur le transfert de chaleur. A cet effet, j'ai considéré deux configurations géométriques à savoir : Deux cylindres coaxiaux partiellement remplis par un milieu poreux en mode de convection mixte et un canal plan partiellement poreux en convection forcée.
2. Analyser les effets de la structure des écoulements induits par la présence de blocs poreux sur les caractéristiques thermiques et dynamiques de l'écoulement dans la deuxième configuration.

Le principal résultat de ces deux investigations est la mise en évidence de l'utilisation combinée d'un milieu poreux à perméabilité modérée et d'un fluide non-Newtonien pseudo plastique en tant que moyen d'amélioration du transfert de chaleur avec diminution de la perte de charge.

Le dernier projet de recherche, toujours en cours, a débuté en Janvier 2010 pour une durée de trois années sous la direction du prof K. Bouhadeh. Ce projet aborde la thématique de la rationalisation de l'énergie en utilisant des milieux poreux et / ou des fluides complexes. La pertinence de ce travail réside dans l'évolution des solutions (prise de conscience collective) de la préservation des ressources énergétiques tout en diminuant l'impact négatif sur l'environnement. Ce projet s'articule autour de plusieurs axes d'investigations. Ma contribution à ce travail se fait à travers le thème de la convection thermique et/ou massique dans un écoulement de fluide non Newtonien à travers des espaces fluides ou des matrices

poreuses inertes ou réactives, placées dans des conduits pouvant présenter différentes formes (plane, cylindrique, annulaire...). Le but du travail proposé est une contribution à l'analyse de des écoulements et des transferts thermiques, à l'aide d'une approche numérique. Les effets de la position relative des conduites l'une par rapport à l'autre (concentriques ou excentrées), sur l'écoulement seront analysés. L'influence des propriétés rhéologiques du fluide non-Newtonien (Rhéo-fluidisant, Rhéo-épaississant, ...) sera également considérée. L'application la plus évidente est celle relative au traitement des eaux ou au raffinage de produits tels que les hydrocarbures ou leurs dérivés. Une application biomédicale est également possible en plasmaphèrese ou en pharmacologie. J'ai orientée ma contribution autour de l'amélioration de l'efficacité des capteurs solaires photovoltaïques par un refroidissement optimal. J'étudie, en particulier, l'apport de l'introduction d'un milieu poreux pour améliorer le refroidissement tout en utilisant la chaleur évacuée pour des besoins de chauffage. Ceci constitue l'idée de base des capteurs hybrides (thermiques+photovoltaïques).

Actuellement, dans le cadre des PNR, j'ai intégrée une équipe de recherche sous la direction du Dr. Madani Brahim en vue de mener un projet de recherche sur les matériaux cellulaires. Ce projet se basera sur une approche numérique et expérimentale. Ces matériaux, appelés aussi mousses métalliques, présentent des porosités importantes et peuvent ainsi contribuer à l'amélioration de chaleur. Ma contribution dans ce projet portera sur la modélisation numérique d'une mousse métallique en présence de réactions chimiques en vue de la production de l'hydrogène par craquage du méthane. Ce projet vient juste de recevoir son agrément.

Les résultats obtenus dans le cadre de mes activités de recherche sont basés, globalement, sur des études numériques basées sur la méthode des volumes finis. Les procédures numériques sont construites autour des algorithmes SIMPLE et SIMPLER pour le traitement du couplage entre les champs de vitesse et de pression (Patankar, 1980). Différents schémas d'interpolation (PLDS SOUS et QUICK) ont été utilisés pour la discrétisation des termes de convection et de diffusion dans les équations de conservation. Des codes de calcul ont, ainsi, été élaborés au sein du laboratoire et confirmés par des confrontations satisfaisantes par rapport aux résultats de la littérature. Par ailleurs, l'exploitation des résultats de ces codes a donné lieu à plusieurs communications internationales et publications dans des revues de renommées établies. Ma production scientifique dans l'investissement des différents projets de recherche compte le bilan suivant :

Dans ce qui suit, quelques détails sur le développement de mes axes de recherche sont brièvement exposés avant de présenter les résultats scientifiques essentiels obtenus

## II. ANALYSE DU TRANSFERT DE CHALEUR DES CONDUITES DE DIFFERENTES SECTIONS EN PRESENCE UN MILIEU POREUX

La modélisation du phénomène de transport dans les milieux poreux par l'approche de la mécanique des milieux continus exige le passage de l'échelle microscopique à l'échelle macroscopique qui permet d'établir une équivalence entre le milieu réel dispersif et un milieu continu fictif. Darcy (1856) fut le premier à observer la relation linéaire entre la vitesse de filtration et la chute de pression macroscopique imposée à l'écoulement à travers un milieu poreux. Lorsque cette vitesse est relativement grande, la dépression est influencée en plus par l'action des forces inertielles microscopiques et devient supérieure à celle calculée par la loi de Darcy. Plusieurs auteurs ont essayé de quantifier les effets inertiels dans différents systèmes poreux (Ergun, 1952, Coulaud et al., 1988, Sahraoui et Kaviany, 1992, Kuwahara et al., 1996). D'un autre côté, le transfert de chaleur n'est pas seulement affecté par l'existence de l'écoulement moyen, mais aussi par l'interaction entre les fluctuations locales de température et de vitesse à l'échelle des pores qui génèrent la dispersion thermique.

Dans l'industrie thermique le transfert de chaleur est le phénomène physique le plus exploité en vue de la production de l'énergie. Les échangeurs de chaleurs sont les systèmes qui exploitent ce phénomène dans leur fonctionnement. De ce fait, d'innombrables investigations aussi bien expérimentales que théoriques ont été conduites dans le but d'améliorer le transfert de chaleur et diminuer la perte de charge.

Un effort d'investigation considérable a été consacré aux phénomènes de transport dans les milieux poreux. Cet intérêt est motivé par les innombrables applications de ces milieux dans l'industrie et leur présence dans de nombreux phénomènes naturels. Les possibilités qu'offrent les milieux poreux dans l'amélioration de l'efficacité énergétique des systèmes thermique constituent, aussi, une motivation supplémentaire dans l'étude des phénomènes physiques y prenant naissance. Ainsi Vafai et tien /1981/, Hadim /1994/ et Chikh et al /1995/, entre autres, se sont intéressés à la convection forcée en milieux confinés totalement et partiellement poreux. Cependant, ils n'ont considéré que le cas de fluides Newtoniens. La plus part des études consacrées aux fluides non Newtoniens en présence de milieux poreux se rapportent aux écoulements externes. Parmi ces travaux, citons ceux de Nakayama /1991/, Gorla et al /1998/ et Getechaw et Minkowic /1996, 1998/ qui pour leur part ont analysé la convection naturelle dans une cavité carrée en ne considérant que les effets Darcéens. Nakayama et Shenoy /1993/ et Hadim et Chen /1998/ ont été parmi les pionniers à s'intéresser

aux écoulements forcés des fluides non Newtoniens dans des espaces confinés. A travers la revue bibliographique, il ressort que le cas des écoulements forcés de fluides non-Newtoniens n'est pas assez documenté. A cet effet, à travers les différents projets de recherches cités plus haut et dans le cadre de la préparation de ma thèse de doctorat es Sciences, j'ai conduits plusieurs investigations sur les caractéristiques dynamique et thermique des écoulements de fluides non-Newtoniens dans des conduites de différentes sections totalement ou partiellement poreuses. Un effort particulier a été consacré aux effets de l'épaisseur du substrat poreux sur l'écoulement dans le but d'aboutir à un compris entre le gain éventuel dans le transfert de chaleur et l'effort de pompage supplémentaire à fournir afin d'assurer l'écoulement.

### **2-1 Motivations :**

Les propriétés rhéologiques des fluides non-Newtoniens peuvent altérer d'une manière significative les caractéristiques dynamiques et thermiques des écoulements. Pour estimer les retombées de cet impact il est primordial d'entreprendre des études en ce sens. Le manque de travaux de recherche relatifs aux écoulements des fluides non-Newtoniens dans des conduites totalement ou partiellement poreuses et les différentes applications industrielles mettant en jeu les milieux poreux et/ ou les fluides non-Newtoniens ont rendu ces investigations pertinentes à plus d'un titre.

### **2-2 Objectifs :**

Les objectifs poursuivis dans ces travaux de recherches sont principalement :

- i. Développer un code numérique basé sur la formulation des volumes finis pour prédire les champs de la vitesse et de la température pour un écoulement en convection forcée laminaire dans une conduite tridimensionnelle partiellement ou totalement poreuse.
- ii. Etudier les effets des caractéristiques géométriques et thermophysiques de la matrice poreuse sur les propriétés dynamiques et thermiques de l'écoulement. Une attention particulière est portée aux variations du nombre de Nusselt.
- iii. D'analyser les effets du comportement rhéologique du fluide non-Newtonien et le rapport de forme sur le transfert de chaleur et les pertes de charges.

## 2-2-1 Conduite à section carrée

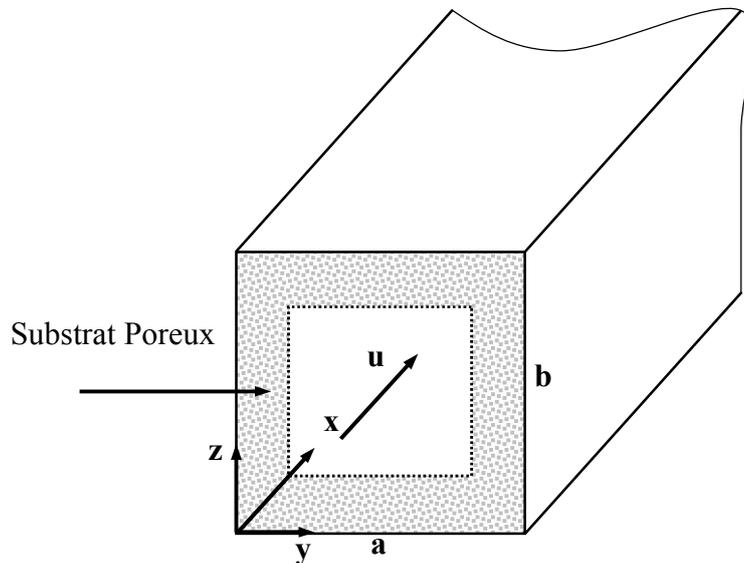


Figure 1 Conduite à section rectangulaire

Dans ce travail, qui a été parmi les premiers dans cette configuration, j'ai considéré un certain nombre d'hypothèses simplificatrices dont la plus importante est l'établissement dynamique et thermique de l'écoulement en vue de simplifier la modélisation.

Comme paramètres influents à même de répondre aux objectifs de l'investigation, on a considéré l'indice  $n$ , l'épaisseur et la perméabilité (nombre de Darcy) du substrat poreux et le rapport des conductivités thermiques. Ces paramètres ont une incidence directe sur le coefficient de frottement et le nombre de Nusselt qui renseignent respectivement sur la perte de charge et le transfert de chaleur.

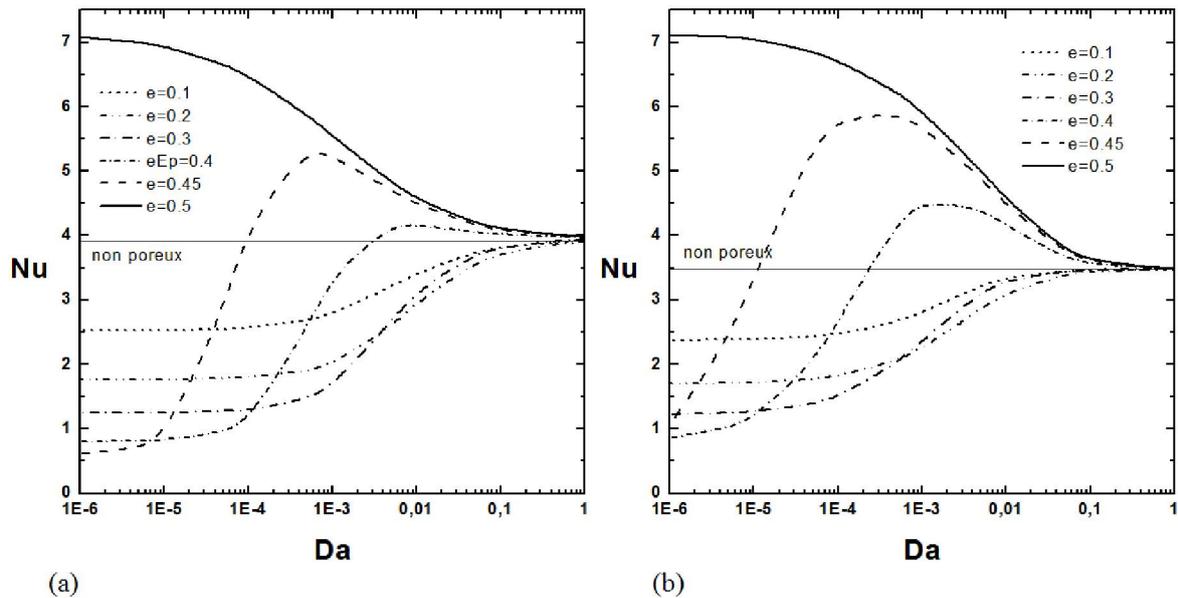
Les évolutions du nombre de Nusselt périphérique moyen,  $Nu$ , représentées sur la figure montrent des comportements intéressants. D'un point de vue phénoménologique, les deux familles de fluides présentent un même comportement thermique. L'analyse de la figure 2a qui concerne les fluides rhéoépaississants ( $n=0.5$ ), on observe trois différents types d'évolutions de  $Nu$ . Premièrement, pour des milieux poreux remplissant la conduite à hauteur de 60%,  $Nu$  augmente avec la perméabilité jusqu'à atteindre une valeur asymptotique, qui correspond à la valeur pour le cas de la conduite non poreuse, égale à 3.91. De plus, pour de

faibles perméabilités, jusqu'à approximativement  $Da = 10^{-5}$ , l'augmentation de l'épaisseur de la couche poreuse s'accompagne par une altération du transfert de chaleur. Ceci est dû, d'un côté, à l'augmentation de la résistance à l'écoulement causée par la présence du milieu poreux qui fait que la majorité du fluide passe dans la région fluide de la conduite, et d'un autre côté, à l'augmentation de la résistance thermique équivalente qui fait accroître les effets de la conduction thermique. Le second type d'évolution est celui observé pour des épaisseurs allant de 0.4 à 0.45.  $Nu$  est une fonction croissante de  $Da$ , tant que de la perméabilité n'a pas atteint une valeur critique ( $Da = 10^{-3}$  pour  $e = 0.45$ ) au delà de laquelle,  $Nu$  diminue. Une amélioration du transfert de chaleur peut être obtenue pour des valeurs particulières de  $Da$ . Cette amélioration est d'autant plus importante que les couches poreuses sont plus épaisses.

Le dernier comportement correspond à la conduite totalement poreuse. Dans ce cas, une amélioration du transfert de chaleur est obtenue pour n'importe quelle perméabilité. Cependant,  $Nu$  diminue avec l'augmentation de  $Da$ . Ce qui peut être expliqué par le fait qu'à faibles perméabilités, la vitesse peut être considérée comme étant uniforme sur toute la section de la conduite (régime Darcéen) et validerait ainsi une condition de glissement aux parois de la conduite (Khellaf et Lauriat /1995/).

L'utilisation des milieux poreux comme technique d'amélioration du transfert de chaleur s'accompagne par une augmentation de la perte de charge. C'est un paramètre essentiel à prendre en considération, car dans les applications industrielles, cette perte de charge additionnelle représente le prix à payer en contrepartie de l'augmentation, éventuelle, du transfert de chaleur. Ainsi, à mesure que l'on augmente la quantité de matière poreuse, la perte de charge augmente en conséquence, comme cela est illustré sur la figure 3. Dans le régime Darcéen, qui correspond aux très faibles perméabilités, la perte de charge augmente d'une manière significative avec l'accroissement de  $n$ . En effet, la perte de charge obtenue avec les fluides dilatants ( $n=0.5$ ) et une conduite totalement poreuse est inférieure à celle obtenue avec les fluides épaississants ( $n=1.5$ ) de 1000 fois approximativement. Ce rapport n'est plus que de 10 quand la conduite est garnie à 80% de milieu poreux. L'augmentation de la perméabilité entraîne la diminution de la perte de pression jusqu'à atteindre la valeur asymptotique de la conduite claire (sans milieu poreux). Cependant, l'écart existant entre les différents fluides diminue avec  $Da$  jusqu'aux valeurs obtenues avec la conduite sans milieu poreux. Ce résultat concorde bien avec celui rapporté par Hartnett and Kostic /1989/.

Pour des couches poreuses plus épaisses, il est intéressant de noter, tel qu'illustré sur la figure 3(b), qu'il existe des valeurs particulières de  $Da$ , indépendantes de  $n$ , en deçà desquelles la perte de charge n'est pratiquement plus affectée par la variation de l'épaisseur du substrat poreux. Ainsi, au delà  $Da \cong 10^{-4}$  la perte de charge de la conduite entièrement poreuse et celle de la conduite remplie à 90% exhibent les mêmes valeurs. Alors que pour la conduite remplie à 80% cette valeur est  $Da \cong 10^{-3}$ .



Figures 2 Evolution du nombre de Nusselt périphérique moyen avec la perméabilité.

a-  $n=1.5$ , b-  $n=0.5$

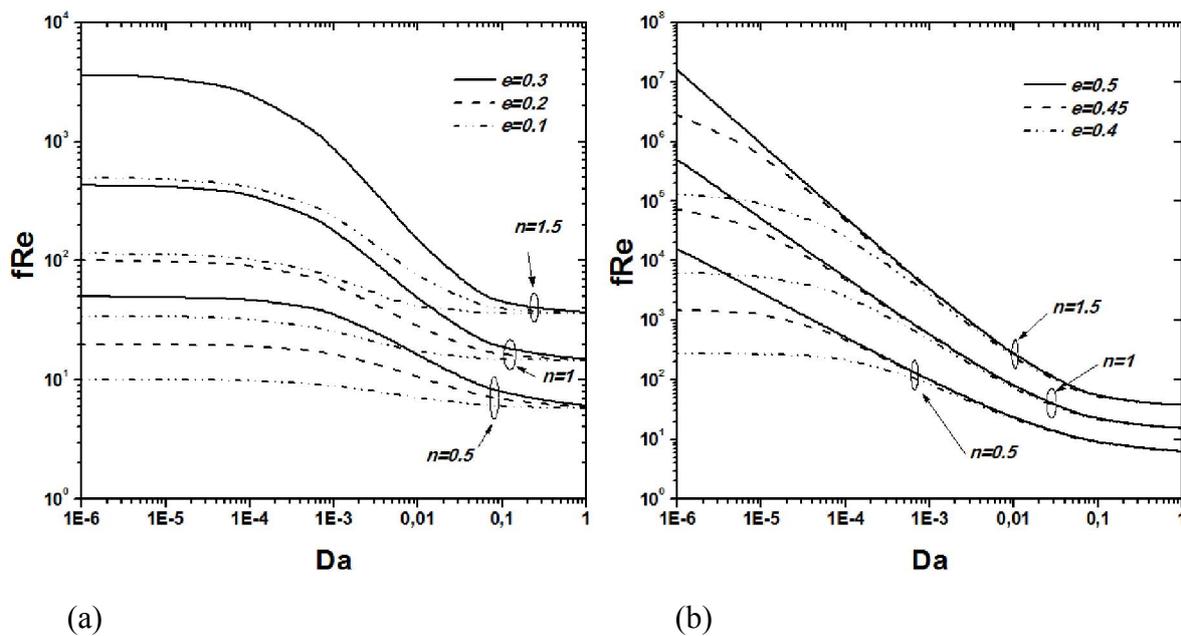


Figure 3 Variations du coefficient de frottement en fonction de la perméabilité

Ce travail a donné lieu à deux publications internationales :

1. **R. Nebbali**, et K. Bouhadef, 2004, *Numerical study of non-Darcy forced convection in a rectangular duct saturated with a power-law fluid*, IASME Transactions, Issue 3, volume 1, pp. 522-527.
2. **R. Nebbali** et K. Bouhadef, 2006, *Numerical study of forced convection in a 3D flow of a non-Newtonian fluid through a porous duct*, Int. J. of Numerical Methods for Heat and fluid flow, Volume 16, Number 8, 2006

### 2-2-2 Canal plan

Dans cette géométrie, le but était l'analyse de l'effet de la structure de l'écoulement sur les caractéristiques thermiques et hydrodynamiques de l'écoulement. A cet effet, on a considéré trois configurations géométriques représentées sur la figure 4.

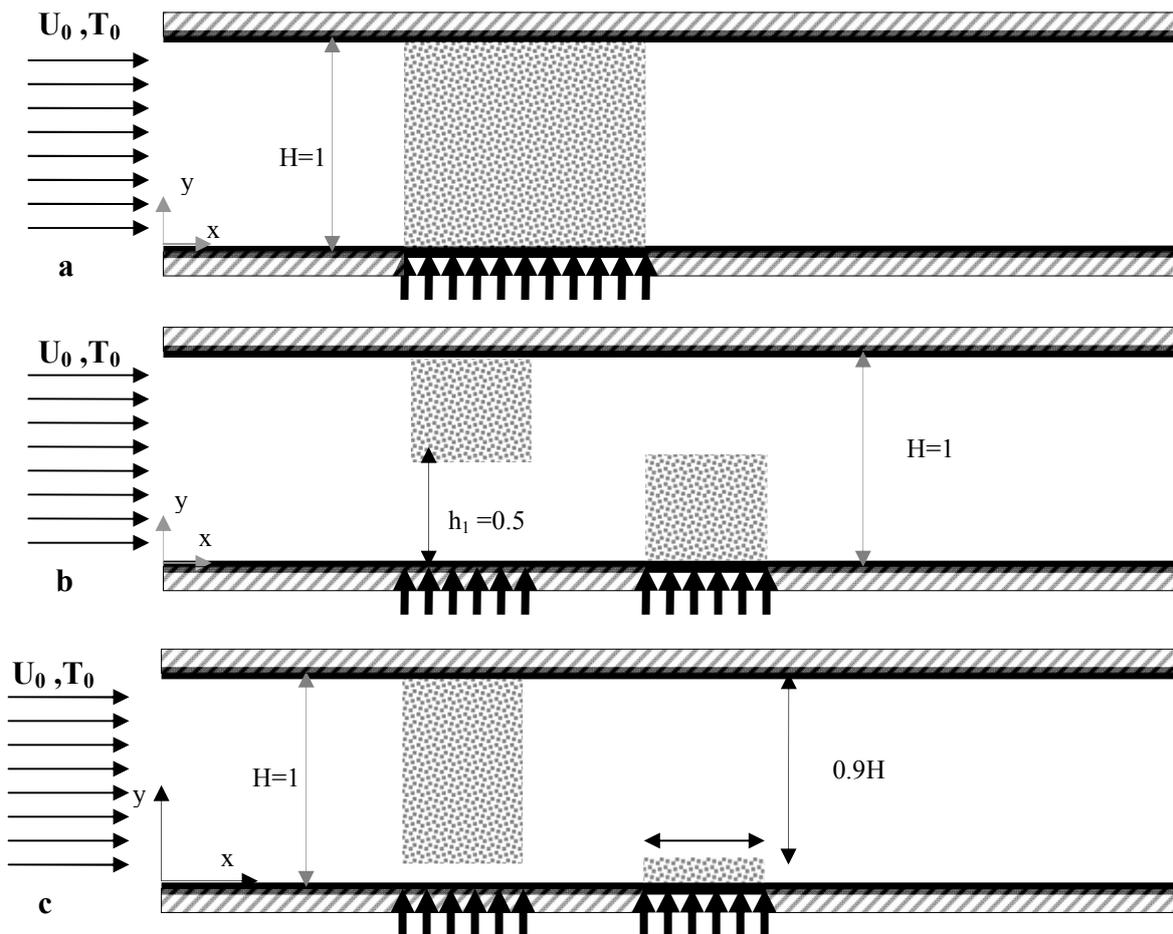


Figure 4 Configurations bidimensionnelles étudiées

L'utilisation des milieux poreux comme technique d'augmentation du transfert de chaleur est une des méthodes utilisées ces dernières années et a été fait l'objet de plusieurs travaux expérimentaux et théoriques.

Plusieurs résultats intéressants ont été obtenus au cours de ces investigations. Qu'on résume dans ce qui suit :

1. Pour le cas d'un bloc poreux occupant toute la hauteur du canal, une amélioration du transfert de chaleur est obtenue pour toute la plage des perméabilités considérées. Les fluides pseudo-plastiques montrent le meilleur transfert de chaleur avec la plus faible perte de charge contrairement à la première étude où se sont les fluides dilatants qui exhibaient le meilleur transfert avec, cependant, la perte de charge la plus importante.
2. Dans la disposition en chicanes des blocs poreux (fig. 4b), on utilise deux fois moins de matière poreuse. Dans ces conditions, le transfert de chaleur ne présente plus un comportement monotone (figure ..). Ainsi, le transfert maximal est obtenu à une perméabilité intermédiaire pour laquelle la perte de charge est moindre. De plus, on peut améliorer ces performances thermiques en jouant sur d'autres paramètres comme la conductivité thermique sans pour autant augmenter la perte de charge.
3. Dans la troisième disposition, on améliore le transfert de chaleur mais en augmentant sensiblement la perte de charge.

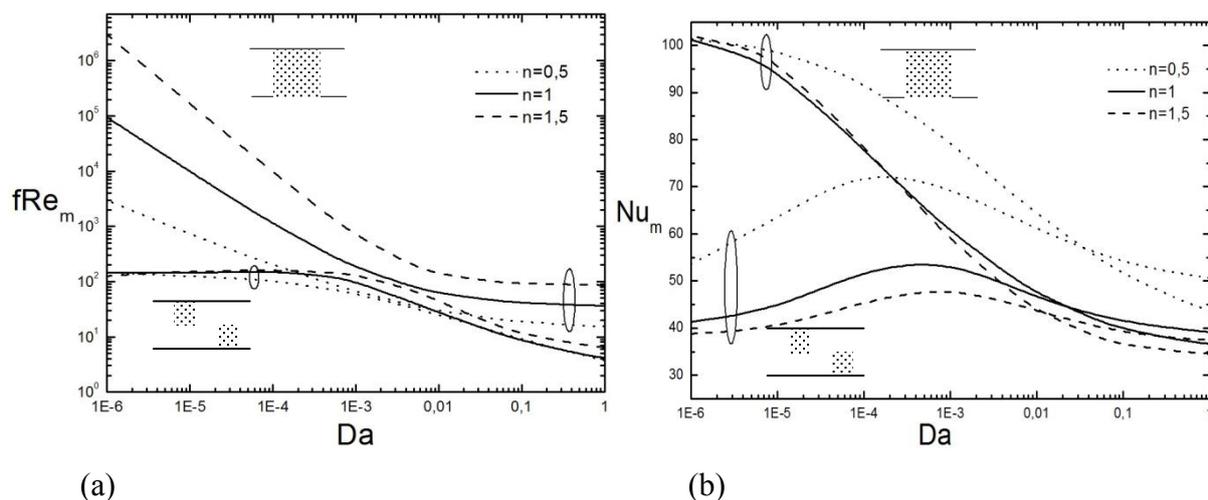


Figure 5 Effets de la perméabilité, de  $n$  et de la configuration sur le coefficient de frottement et le nombre de Nusselt moyen. a-  $fRe_m$ , b-  $Nu_m$ .

Cette investigation a donnée lieu à :

Une communication nationale

**R. Nebbali** et K. BouhadeF, 2006, *Analyse numérique de la convection forcée dans un canal partiellement poreux traversé par un fluide non-Newtonien*, 5<sup>èmes</sup> Journées de mécanique, 28-29 Mars 2006, EMP, Alger.

Une communication internationale

**R. Nebbali** et K. BouhadeF, 2009, *Forced convection in a plan channel partially filled by porous blocks in presence of a non-Newtonian fluid*, ICCM3E, 20-22 Nov, Sousse, Tunisie.

Une publication internationale

**R. Nebbali** et K. BouhadeF, 2011, *Non-Newtonian fluid flow in plane channels: Heat transfer enhancement using porous blocks*, Int. J. thermal. Sci., [doi:10.1016/j.ijthermalsci.2011.04.013](https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2011.04.013)

### 2-2-3 Conduite cylindrique annulaire

Ce travail a été réalisé dans le cadre de l'encadrement de M. KHALI Samir pour la préparation de son mémoire de Magister sous la supervision du professeur K. BOUHAEDEF. Il s'agissait d'étudier la convection mixte dans une conduite cylindrique annulaire verticale partiellement poreuse en présence d'un fluide non-Newtonien.

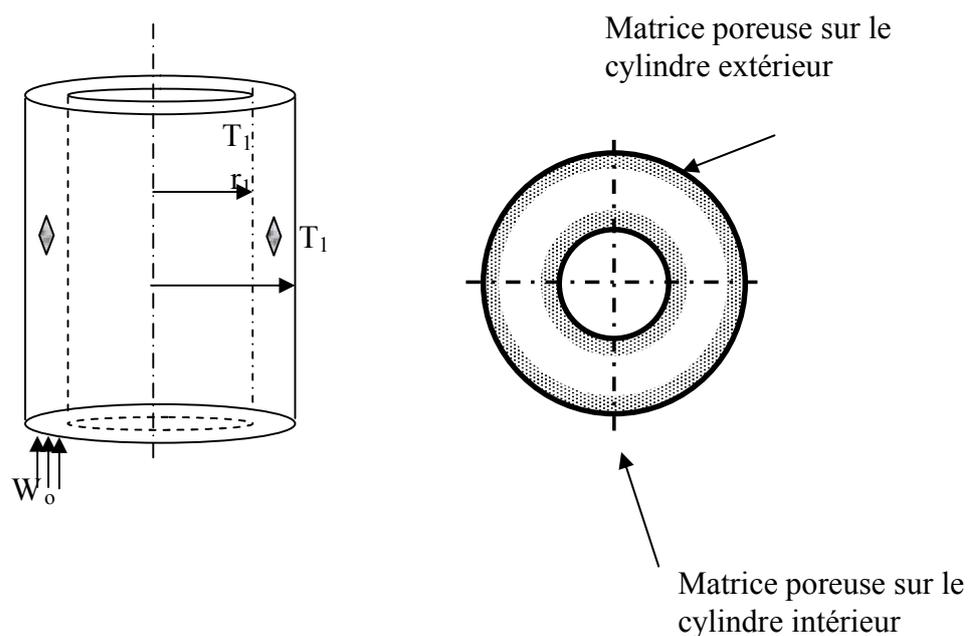


Figure 6 Configuration géométriques

Il s'agissait d'analyser l'effet d'un certain nombre de paramètres comme le nombre de Grashof, la perméabilité, l'indice de comportement sur les caractéristiques thermiques et hydrodynamiques de l'écoulement. Nous avons, considéré aussi le cas de la convection forcée. L'essentiel des résultats obtenus est résumé dans ce qui suit :

1. Pour le cas d'une conduite totalement ou partiellement poreuse, les fluides dilatants ( $n > 1$ ) engendrent les plus grandes pertes de charge quelque soit la valeur de la perméabilité et du rapport de forme. Par ailleurs, l'insertion d'un substrat poreux (cas partiellement poreux) sur le cylindre intérieur s'est avérée comme étant plus favorable pour l'amélioration du transfert de chaleur. De plus, l'effet de l'indice de comportement  $n$  sur le transfert de chaleur dans les deux configurations est inverse. Ainsi dans la configuration a c'est les fluides épaississants ( $n < 1$ ) qui présentent un meilleur transfert de chaleur alors que la configuration b ( $n > 1$ ) c'est les fluides dilatants qui sont thermiquement plus performants.
2. Pour la convection forcée, les résultats obtenus ont montré que l'insertion d'un milieu poreux améliore le transfert de chaleur mais engendre un accroissement important de la perte de charge. Les fluides dilatants ( $n > 1$ ) engendrent les plus grandes pertes de charge quelque soit la valeur de la perméabilité et du rapport de forme. Par ailleurs, l'utilisation de substrat poreux a conductivité thermique élevée présente un intérêt certain du moment qu'elle permet l'amélioration du transfert de chaleur sans engendrer une perte de charge additionnelle.

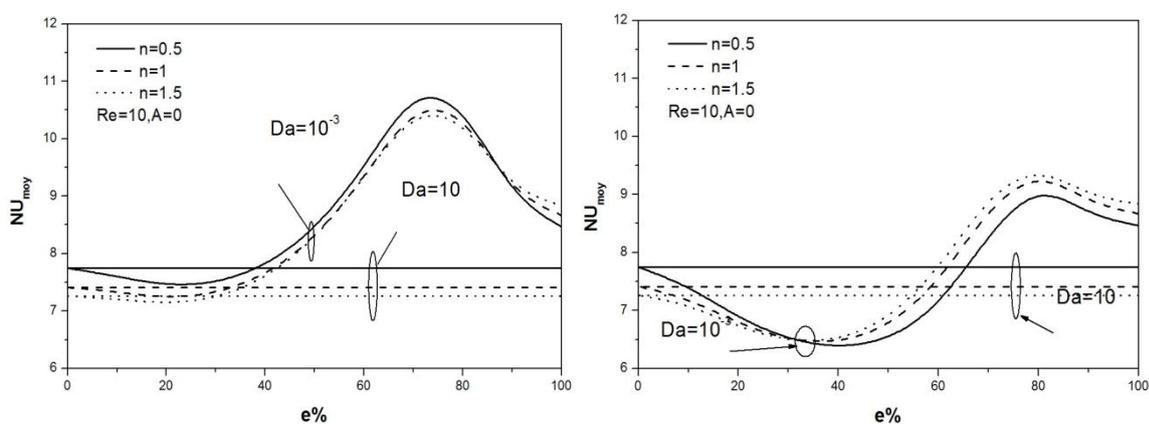


Figure 7 Variation du nombre de Nusselt moyen en fonction de  $e$  pour un rapport de forme de 0.5. a- matrice poreuse sur le cylindre intérieur, b- matrice poreuse sur le cylindre extérieur

Ce travail a donné lieu :

A une communication internationale :

**R. Nebbali** S. Khali et K. Bouhadeb, 2007, *Analyse de la convection forcée dans une conduite annulaire poreuse parcourue par un fluide non-Newtonien*. International Conference on Energetics and Pollution (ICEPC'07) Constantine, Algérie, 01-02, Décembre 2007,

A une communication nationale:

**R. Nebbali** S. Khali et K. Bouhadeb, 2008, *Analyse de la convection forcée dans une conduite annulaire poreuse en présence d'un fluide non Newtonien*, 8<sup>èmes</sup> Congrès national de la physique et de ses applications (CNPA08), 11 au 13 Novembre 2008, Bejaia.

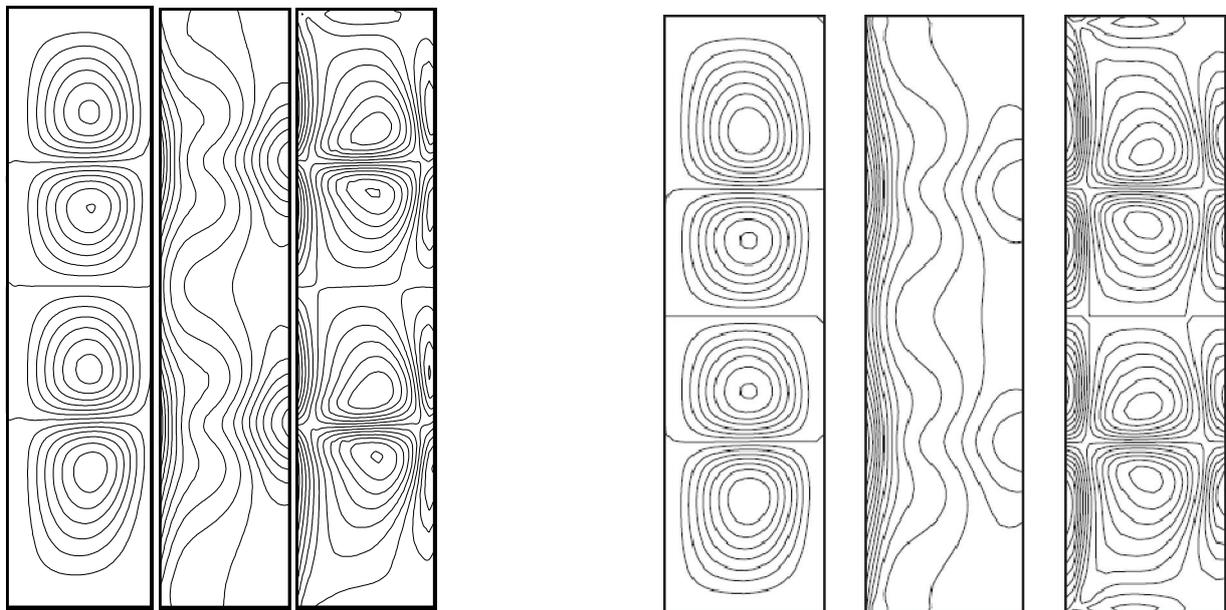
Dans la suite de ce travail, j'ai analysé l'effet de la dissipation visqueuse quand le canal est totalement poreux et en considérant la diffusion axiale. L'écoulement a été considéré comme étant dynamiquement établi alors que l'établissement thermique a été analysé en fonction des nombres de Brinkmann et de darcy et de l'indice de comportement  $n$ . Parmi les résultats obtenus, Il a été établi que le nombre de Nusselt dépend fortement de la dissipation visqueuse et de la conduction de la chaleur axiale. Le nombre de Nusselt asymptotique à l'état entièrement développé diminue avec l'augmentation de l'indice de comportement du fluide. Par ailleurs, on a constaté que même une petite quantité de dissipation visqueuse entraîne une augmentation substantielle de la valeur du nombre de Nusselt pour le cas de parois isothermes.

Ce travail a donné lieu à une communication internationale :

1. **R. Nebbali** et K. Bouhadeb, 2010, *Effect of viscous dissipation and fluid axial heat conduction on heat transfer for non-Newtonian fluids in a porous annular duct*. The fifth International Conference on Advances in Mechanical Engineering and Mechanics, ICAMEM2010, December 18-20, 2010 Hammamet, Tunisia. [www.icamem2010.org](http://www.icamem2010.org)

### III TRAVAUX EN COURS

Sous la supervision du Professeur K. Bouhadeef et dans le cadre de l'encadrement de M. KHALI Samir dans la préparation de sa thèse de doctorat, nous faisons une investigation sur l'écoulement de fluides non-Newtoniens dans des conduites cylindriques annulaires avec rotation du cylindre interieur. Ce travail est motivé par la présence de cette configuration d'écoulement dans plusieurs processus industriels comme le forage pétrolier, la lubrification et la rhéologie pour ne citer que ceux la. Dans ce travail, nous avons adopté une approche numérique basée sur la methode LBM (*lattice boltzmann method*). C'est une méthode assez récente qui connait un engouement important à cause de ces avantages liés au temps de calcul et sa facilité à être parallélisée. Cette méthode fut développée initialement pour le cas d'écoulement de fluides Newtoniens en géométrie cartésienne. Dans notre travail, nous avons une géométrie axisymétrique en présence de fluides non-Newtoniens. Nous avons donc adopté l'évolution axisymétrique introduite par Halliday et al. (2001) que nous adapterons aux cas de fluides non-Newtoniens. Nous avons élaboré un code calcul que nous avons validé par une confrontation aux résultats de la littérature en particulier pour l'écoulement de Taylor Couette comme le montre la figure 8. Actuellement une publication est encore de préparation pour être soumise à un journal de renommée.



(a) Present work

(b) Huang <sup>[3]</sup>

Figure 8. Lingnes de courant, pression et vorticité pour un fluide Newtonien.

Re	$\Psi_{\max}$	$\Psi_{\max}$ Huang <sup>[3]</sup>	$\Psi_{\max}$ Niu <sup>[2]</sup>	$\Psi_{\max}$ Liu <sup>[9]</sup>	Error <sub>max</sub>
85	$4.858 \times 10^{-2}$	$4.810 \times 10^{-2}$	$4.859 \times 10^{-2}$	$4.854 \times 10^{-2}$	0.99 %
100	$5.472 \times 10^{-2}$	$5.501 \times 10^{-2}$	$5.580 \times 10^{-2}$	$5.542 \times 10^{-2}$	1.93 %
150	$6.450 \times 10^{-2}$	$6.427 \times 10^{-2}$	$6.387 \times 10^{-2}$	$6.442 \times 10^{-2}$	0.98 %

Table1. Validation  $\Psi_{\max}$  pour l'écoulement de Taylor-Couette pour  $Re=85$  and  $Re=100$

Par ailleurs, toujours dans le cadre de l'utilisation des matériaux poreux comme moyen de l'amélioration du transfert de chaleur, je travail avec un collègue tunisien, Dr. Jamel Orfi (King Saudi university) sur l'amélioration de l'efficacité des capteurs solaires photovoltaïques. En effet, cette efficacité est d'autant plus élevée que la température du capteur est basse. On s'est proposée d'inclure des substrats poreux dans ces capteurs afin d'améliorer leurs refroidissement. Le fluide de refroidissement ayant acquis une certaine quantité de chaleur peut être utilisé comme source de chauffage d'appoint ; c'est le principe des capteurs solaires hybrides (thermique photovoltaïques).

Dans un premier temps, on a considéré un canal plan avec une source de chaleur localisée comme cela est montré sur la figure 9 en convection mixte. Les résultats préliminaires montrent que l'utilisation de milieux poreux dans ces capteurs est intéressante. En effet, la température de surface du capteur (source) peut être réduite par rapport à un refroidissement sans milieux poreux. Cependant, on a simultanément une augmentation de la perte de charge. Une étude plus poussée est nécessaire pour aboutir à des résultats optimales. Ceci se fera en élargissant le champ d'investigation en analysant l'effet de paramètres supplémentaires et en utilisant éventuellement des fluides non-Newtoniens.

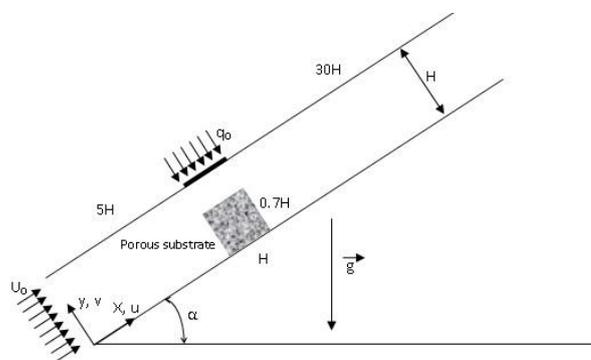


Figure 9 Configuration géométrique

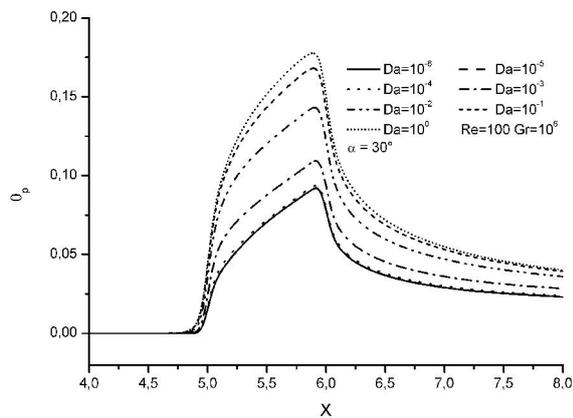


Figure 10 Variation des profils de la température de paroi avec le nombre de Darcy.

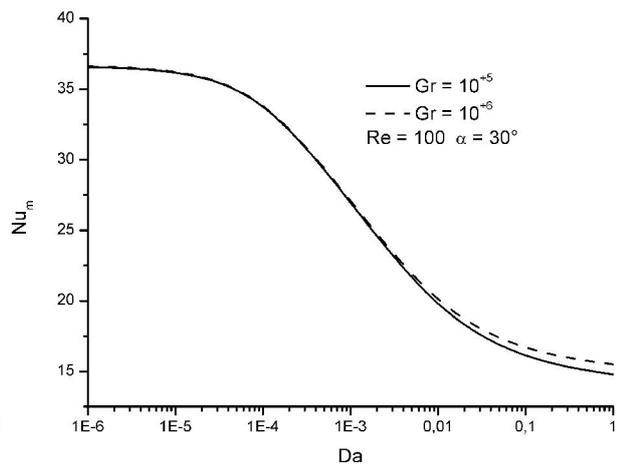


Figure 11 Variation du nombre de Nusslet moyen avec le nombre de Darcy et le nombre de Grashof.

Ces premiers résultats ont été soumis dans une conférence internationale en Turquie et ont été acceptées pour communication.

RachidNebbalia and Jamel Orfi<sup>a</sup>, Mixed convection from an isolated heat source in an inclined parallel plate channel with porous medium, submitted and accepted for 7<sup>th</sup> ICCHMT, Istanbul 18-22 July 2011.

<sup>a</sup> Department of Mechanical Engineering, King Saudi University, P.O. Box 800, 11421, Riyadh, KSA.

## **ENCADREMENT**

Le Professeur K. BouhadeF, m'a honoré, par la confiance qu'elle m'a témoignée, en me permettant d'encadrer, sous sa supervision, de M. KHALI Samir pour son mémoire de Magister intitulé :

*Analyse de de la convection mixte dans les conduites annulaires poreuses en présence d'un fluide non Newtonien*

Et soutenu avec succès en 2007 avec mention très bien.

Après la soutenance de mon doctorat, le Professeur K. Bouhadeh, encore une fois, a renouvelé sa confiance en moi en me confiant le suivi, sous sa supervision, M. KHALI Samir dans la préparation de sa thèse de doctorat intitulée :

*Contribution à l'analyse des écoulements de fluides non-Newtoniens dans des conduites annulaires*

## **CONCLUSION**

Les activités de recherche que j'ai menées ces dernières années m'ont permis d'appréhender mieux le métier de chercheur. En particulier, mon intégration au laboratoire des transports polyphasiques et milieux poreux m'a offert l'opportunité de travailler avec des chercheurs confirmés. Les encadrements que j'ai assurés sous la supervision du Professeur K. Bouhadeh m'ont permis d'acquérir une expérience non-négligeable dans la conduite d'un travail d'investigation scientifique. Ma candidature à l'habilitation universitaire me paraît comme la suite logique à donner à ma carrière. Elle permettra de consolider mon autonomie dans la conduite des travaux de recherche d'une part ; d'autres part, je pourrais développer mes sujets d'intérêt scientifique.

## **Références bibliographiques**

- G. Chenand H. A. Hadim, 1998, "Numerical study of non-Darcy forced convection in a packed bed saturated with a power-law fluid, Journal of Porous Media, Vol.1, No2, pp.147-57.
- S. Chikh, A. Boumediene, K. Bouhadeh et G. Lauriat, 1995, "Non-Darcian forced convection analysis in an annulus partially filled with a porous material", Numerical Heat Transfer, Part A, Vol. 28, pp. 707-22.
- O. Coulaud, P. Morel And J. P. Caltagirone, 1988, Numerical modelling of non linear effects in laminar flow through a Porous Medium, J. Fluid Mech, 190, 393-407.
- Darcy H., Les fontaines publiques de la ville de Dijon, Dalmont, Paris, 1856.
- D. Getachew, W. J. Minkowycz et D. Poulikakos, 1996, "Natural convection in a porous cavity saturated with a non-Newtonian fluid". Journal of Thermophysics and Heat Transfer, Vol. 10, No. 4, pp. 640-651.

- D. Getachew, W. J. Minkowycz et D. Poulikakos, 1998, "Double diffusion in a porous cavity saturated with a non-Newtonian fluid", *Journal of Thermophysics and Heat Transfer*, Vol. 12, No. 3, pp. 437-446.
- R. S. Gorla, et M. Kumari, 1998, "Non-similar solutions for mixed convection in non-Newtonian fluid a long a vertical plate in a porous medium", *Transport in Porous Media*, Vol. 33, pp. 295-307.
- A. Hadim, 1994, "Forced convection in porous channel with localized heat sources", *Journal of Heat Transfer*, Vol 116, pp. 465-71.
- I. Halliday, L. A. Hammond and C. M. Care, 2002, Enhanced closure scheme for lattice Boltzmann equation hydrodynamics, *J. Phys. A: Math. Gen.* 35 L157–L166.
- J. P. Hartnett et M. Kostic, 1989, "heat transfer to Newtonian and non-Newtonian fluids in rectangular ducts", *Advances in heat transfer*, Vol. 19, pp. 247-356.
- H. Huang, T. S. Lee and C. Shu, 2007, Hybrid lattice Boltzmann finite-difference simulation of axisymmetric swirling and rotating flows, *Int. J. Numer. Meth. Fluids* ; 53 : 1707-1726
- K. Khellaf et G. Lauriat, 1995, "Transfert de chaleur dans des espaces annulaires cylindriques verticaux mis en rotation : étude numérique", *Revue Générale de Thermique*, Tome XXXIV, No. 398, pp. 104-116, 1995.
- F. Kuwahara, A.Nakayama and H.Koyama, 1996, A Numerical study of thermal dispersion in porous media, *J. Heat Transfer*, 118, 756-761.
- A.Nakayama, and A. V. Shenoy, 1992, "A unified similarity transformation for Darcy and non-Darcy forced, free and mixed convection heat transfer in non-Newtonian inelastic fluid saturated porous media", *Chemical Engineering Journal*, Vol. 50, pp. 33-45.
- A.Nakayama, and A. V. Shenoy, 1993, "Non-Darcy forced convection heat transfer in a channel embedded in a Non-Newtonian inelastic fluid-saturated porous medium", *Can. J. Chem. Engng.*, Vol. 71, pp. 168-173.
- X. D.Niu, C. Shu, and Y. T. Chew . 2003, An axisymmetric lattice Boltzmann model for simulation of Taylor-Couette flows between two concentric cylinders, *Int J of Modern Physics*;Vol. 14,No.6 , pp. 785–796.
- M. Sahraoui and M.Kaviany, 1992, Slip and no-slip boundary condition at interface of porous, plain media, *Int. J. Heat Mass Transfer*, 35, 927-943.
- K.Vafia andC. L.Tien, 1981, "Boundary and inertia effects on flow and heat transfer in porous media", *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 24, pp. 195-203.