

« *Intensification des transferts dans les échangeurs thermiques  
et multifonctionnels : Techniques, Outils d'analyse et Optimisation* »

# Nanofluides et transfert de chaleur par convection naturelle

Stéphane FOHANNO, Guillaume POLIDORI, Catalin POPA

*Equipe Thermomécanique*

*Groupe de Recherche En Sciences Pour l'Ingénieur (GRESPI)*

*Université de Reims Champagne-Ardenne, France*

- **Contexte et Objectifs**
- **Introduction**
  - Définition d'un nanofluide
  - Bref historique
- **Propriétés thermophysiques**
  - Conductivité thermique
  - Viscosité dynamique
  - Autres propriétés
- **Application à la convection naturelle**
- **Conclusion**
- **Bibliographie**

## Contexte

- Emergence d'un nouveau fluide caloporteur : Le nanofluide
- Candidat potentiel pour application aux échangeurs
- Nombreuses études en convection thermique
- Résultats encourageants mais controversés

## Objectifs

- Présentation succincte des nanofluides et de leurs propriétés
- Indiquer pistes de réflexions sur l'application des nanofluides aux échangeurs et sur les travaux à mener
- Exemple : Application à la modélisation de la convection naturelle

## Définition d'un nanofluide

Suspension de particules de taille nanométrique (nanoparticules) dispersées dans un liquide de base

## Liquides de base courants

- Eau
- Ethylène-glycol
- Huiles

## Caractéristiques des nanoparticules

- Une dimension  $< 100\text{nm}$
- Formes : Sphériques, cylindriques, ...
- Types de nanoparticules
  - Métalliques : Cu, Ag, Au, ...
  - Oxydes :  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , CuO,  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{TiO}_2$  ...
  - Nanotubes de carbone (CNT)

## Bref historique

- Développement des nanotechnologies au début des années 90
  - => Possibilité de produire des particules de tailles submicroniques
  - => Apparition d'un nouveau type de suspension (nanofluide) contenant des nanoparticules

Idée : Pallier inconvénients rencontrés avec particules de plus grandes tailles
- Inconvénients des suspensions contenant des particules de tailles millimétriques ou microniques
  - Fortes pertes de charge
  - Erosion
  - Sédimentation
  - Bouchons dans les écoulements

## Bref historique

- Premiers travaux => Axés principalement sur la conductivité thermique ( $k$ )  
=> Observations expérimentales : Forte augmentation de  $k$  lors de l'ajout de nanoparticules (Plusieurs dizaines de %)

- Application des nanofluides à la convection

*L'amélioration de  $k$  fait-elle du nanofluide un candidat pour remplacer fluide conventionnel dans certains échangeurs?*

⇒ Nombreux travaux sur la convection forcée

⇒ Convections naturelle et mixte : Travaux plus récents et moins nombreux

*Dans quelle mesure peut-on intensifier les transferts convectifs?*

⇒ Quels paramètres doivent-êtré pris en compte?

⇒ Avantages / Inconvénients?

⇒ A-t-on les mêmes réponses selon le type de convection?

## Quelques articles de synthèse récents

- **Kakac S., Pramuanjaroenkij A.** 2009. Review of convective heat transfer enhancement with nanofluids. *Int. J. Heat Mass Transfer* **52**: 3187-3196.
- **Murshed S.M.S., Leong K.C., Yang C.** 2008. Thermophysical and electrokinetic properties of nanofluids – A critical review. *Applied Thermal Engineering* **28**: 2109-2125.
- **Ozerinc S., Kakac S., Yazicioglu A.G.** 2010. Enhanced thermal conductivity of nanofluids: a state-of-the-art review. *Microfluid. Nanofluid* **8**: 145-170.
- **Wang X.-Q., Mujumdar A.S.** 2007. Heat transfer characteristics of nanofluids : a review. *Int. J. Thermal Sciences* **46**: 1-19.
- **Wen D., Lin G., Vafaei S., Zhang K.** 2009. Review of nanofluids for heat transfer applications. *Particuology* **7**: 141-150.

## Comparaison des conductivités thermiques ( $k$ ) de quelques solides et fluides à 20°C

Matériaux	Aluminium (Al)	Cuivre (Cu)	Alumine (Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	Eau	Air	Ethylène-Glycol (40%-60%)
$k$ (W.m <sup>-1</sup> .K <sup>-1</sup> )	237	401	36	0,60	0,0263	0,249

- $k$  solide  $\gg$   $k$  fluide  
 $\Rightarrow$   $k$  effective de la suspension?  
 $\Rightarrow$  modèle théorique proposé par Maxwell (1873) pour une suspension diluée  
(Fraction volumique  $\phi < 1\%$ )

avec 
$$\phi = \frac{\text{volume de nanoparticules}}{\text{volume de la suspension}}$$

## Modèles de conductivité thermique

( $\phi$  : fraction volumique;  $p$  : particule;  $bf$  : fluide de base,  $nf$  : nanofluide)

- Modèle de Maxwell (1873)

=> Suspension diluée + particules sphériques

$$k_{nf} = \left( \frac{k_p + 2k_{bf} - 2\phi(k_{bf} - k_p)}{k_p + 2k_{bf} + \phi(k_{bf} - k_p)} \right) k_{bf}$$

- Modèle de Hamilton & Crosser (1962)

=> Prise en compte de la non-sphéricité des particules  
( $n=3/\Psi$ ) avec  $\Psi$  : Sphéricité ( $\Psi = 1$  pour une sphère)

$$k_{nf} = \left( \frac{k_p + (n-1)k_{bf} - (n-1)(k_{bf} - k_p)\phi}{k_p + (n-1)k_{bf} + (k_{bf} - k_p)\phi} \right) k_{bf}$$

- Modèles insuffisants pour expliquer la forte augmentation de  $k$   
=> Développement de nombreux modèles intégrant des

phénomènes tels que :

- Mouvement brownien,
- Transport balistique de la chaleur,
- Formation d'amas de nanoparticules...

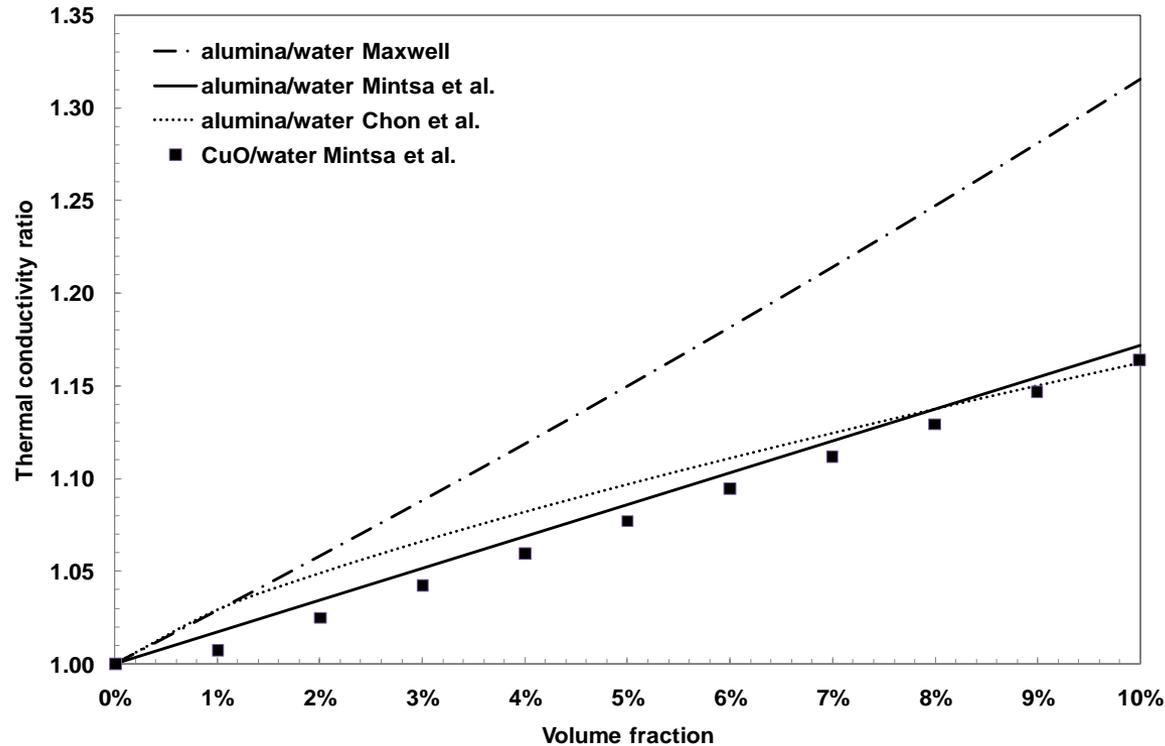
- Exemple : Modèle de Chon et al. (2005)

=> Prise en compte effets du mouvement brownien

$$k_{nf} = k_{bf} \left[ 1 + 64.7 \phi^{0.746} \left( \frac{d_{bf}}{d_p} \right)^{0.369} \left( \frac{k_p}{k_{bf}} \right)^{0.7476} Pr_{bf}^{0.9955} Re^{1.2321} \right]$$

avec  $Re$  basé sur la vitesse brownienne des particules

## Evolution de la conductivité thermique avec la fraction volumique



(Popa et al. 2010, *Int. J. Thermal Sci.*, vol.49)

## **Viscosité dynamique**

( $\phi$  : fraction volumique;  $p$  : particule;  $bf$  : fluide de base,  $nf$  : nanofluide)

- Modèle d'Einstein (1906)  
=> Suspensions diluées

$$\frac{\mu_{nf}}{\mu_{bf}} = 1 + 2.5\phi$$

- Modèle de Brinkman (1952)

$$\frac{\mu_{nf}}{\mu_{bf}} = \frac{1}{(1 - \phi)^{\frac{5}{2}}}$$

## ***Limites des modèles***

- Modèles généralement insuffisants pour décrire l'évolution de la viscosité
  - => Diamètre des particules non pris en compte
  - => Rôle du surfactant ou dispersant inconnu
  - => Rôle de la température

=> Sérieuses difficultés pour la modélisation de la convection

- Autre voie possible pour la modélisation des phénomènes de convection :  
Utilisation de corrélations expérimentales
  - => Nécessité de mesurer la viscosité dynamique et la conductivité thermique sur un même nanofluide

## Corrélations expérimentales

=> Mesure directe de la conductivité et de la viscosité

### a) Eau-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (Maïga et al. 2006; Mintsa et al. 2009)

(Diamètre moyen des particules :  $\overline{d_p} = 47\text{nm}$ )

- Viscosité dynamique  $\mu_{nf} = \mu_{bf} (123\phi^2 + 7,3\phi + 1)$
- Conductivité thermique  $k_{nf} = k_{bf} (1,72\phi + 1)$

### b) Eau-CuO (Nguyen et al. 2007; Mintsa et al. 2009)

(Diamètre moyen des particules :  $\overline{d_p} = 36\text{nm}$ )

- Viscosité dynamique  $\mu_{nf} = \mu_{bf} (0,009\phi^3 + 0,051\phi^2 - 0,3197,3\phi + 1,475)$
- Conductivité thermique  $k_{nf} = k_{bf} (1,74\phi + 0,99)$

## **Autres propriétés => Lois de mélange couramment utilisées**

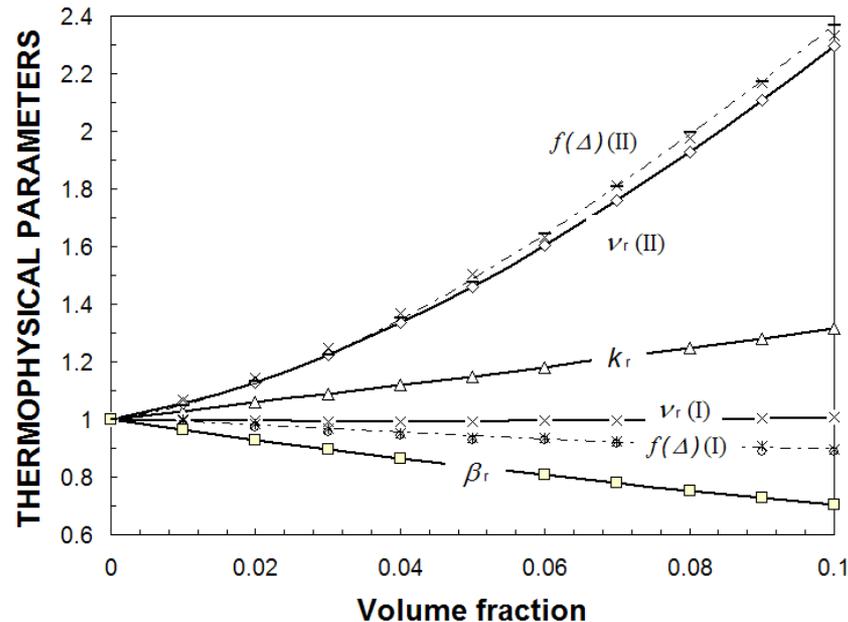
( $\phi$  : fraction volumique;  $p$  : particule;  $bf$  : fluide de base,  $nf$  : nanofluide)

- Masse volumique  $\rho_{nf} = (1 - \phi) \rho_{bf} + \phi \rho_p$
- Coefficient d'expansion volumique  $(\rho\beta)_{nf} = (1 - \phi)(\rho\beta)_{bf} + \phi(\rho\beta)_p$
- Chaleur massique  $(\rho C_p)_{nf} = (1 - \phi)(\rho C_p)_{bf} + \phi(\rho C_p)_p$

*Evolution des paramètres thermophysiques d'une suspension Eau/Alumine avec la fraction volumique + Influence du choix du modèle de viscosité :*

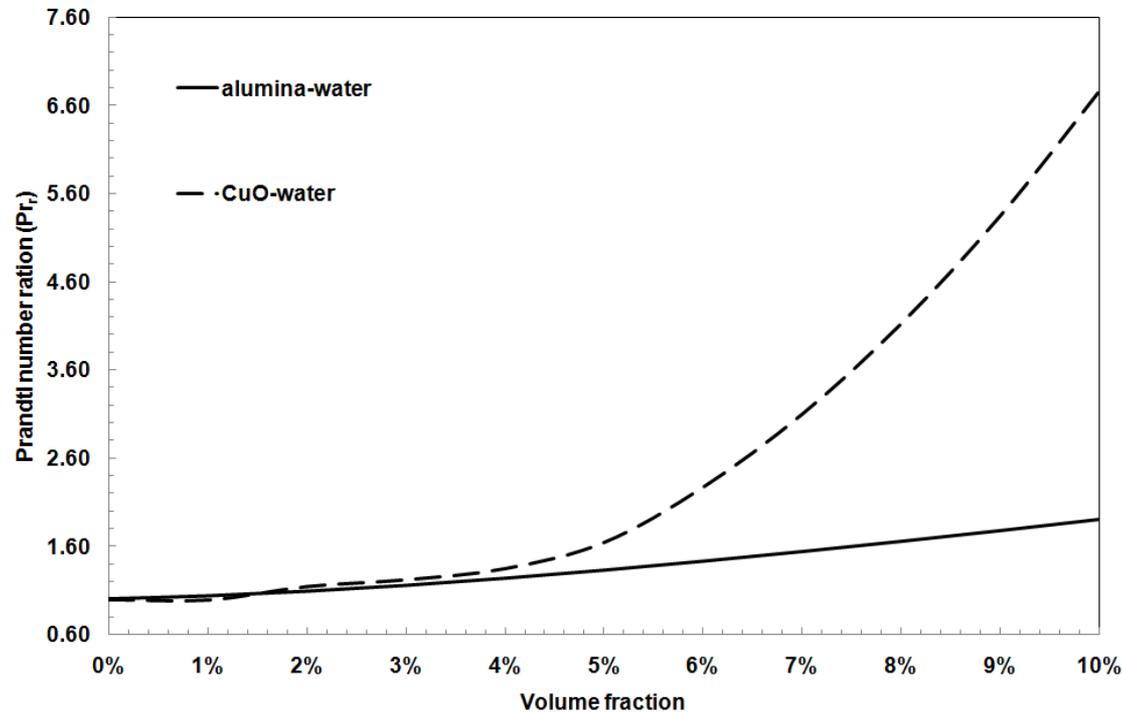
*(I) Modèle analytique de Brinkman (1952)*

*(II) Corrélation expérimentale de Maïga et al. (2005)*



*(Polidori et al. 2007, Int. J. Thermal Sci., vol.46)*

## Evolution du nombre de Prandtl avec la fraction volumique

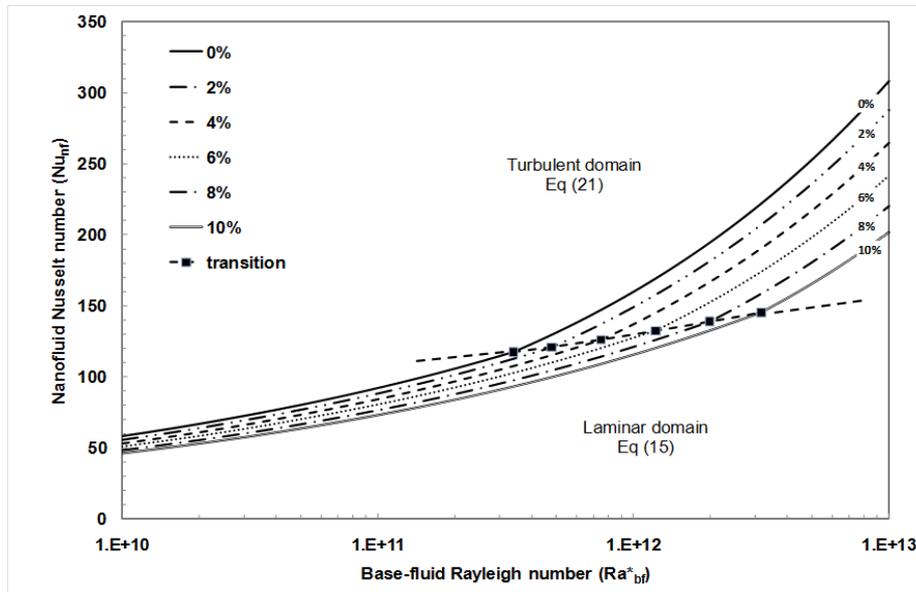


(Popa et al. 2010, *Int. J. Thermal Sci.*, vol.49)

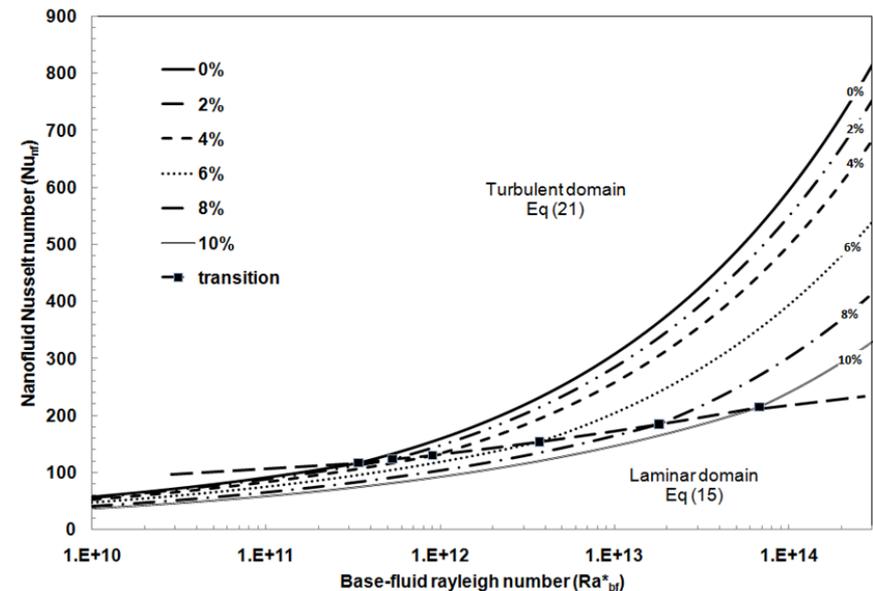
*Modélisation de la convection naturelle externe d'un nanofluide le long d'une plaque plane verticale – Influences de la fraction volumique et de la suspension*

- \* *Corrélations expérimentales pour  $k$  et  $\mu$*
- \* *Lois de mélanges pour les autres propriétés*

*Eau –  $Al_2O_3$*



*Eau – CuO*



*(Popa et al. 2010, Int. J. Thermal Sci., vol.49)*

- Résultats encourageants mais controversés
- Nécessité d'une meilleure connaissance des propriétés thermophysiques
  - => Constitution de bases de données expérimentales
  - => Aide pour la simulation numérique de ces écoulements et la validation de modèles des propriétés
- Extension des études à d'autres types de nanofluides et de géométries:
  - => nécessité de disposer de données expérimentales suffisantes (connaissance de  $k$  et  $\mu$  au minimum)

- **Brinkman H.C.** 1952. The viscosity of concentrated suspensions and solutions. *J. Chem. Phys.* **20**: 571-581.
- **Chon C.H., Kihm K.D., Lee S.P., Choi S.U.S.** 2005. Empirical correlation finding the role of temperature and particle size for nanofluid ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) thermal conductivity enhancement. *Applied Physics Letters*. **87**: 153107.
- **Hamilton R.L., Crosser O.K.** 1962. Thermal conductivity of heterogeneous two-component systems. *I&EC Fundam.* **1**: 182-191.
- **Kakac S., Pramuanjaroenkij A.** 2009. Review of convective heat transfer enhancement with nanofluids. *Int. J. Heat Mass Transfer* **52**: 3187-3196.
- **Keblinski P., Philpot S.R., Choi S.U.S., Eastman J.A.** 2002. Mechanisms of heat flow in suspensions of nano-sized particles. *Int. J. Heat Mass Transfer* **45**: 855-863.
- **Maïga S.E.B., Palm S.M., Nguyen C.T., Roy G., Galanis N.** 2005. Heat transfer enhancement by using nanofluids in forced convection flows. *Int. J. Heat and Fluid Flow* **26**: 530-546.
- **Maxwell J.C.** 1873. *A treatise on electricity and magnetism*. Oxford : Clarendon Press.
- **Mintsa H.A., Roy G., Nguyen C.T., Doucet D.** 2009. New temperature dependent thermal conductivity data for water-based nanofluids, *Int. J. of Thermal Sciences* **48**: 363-371.
- **Murshed S.M.S., Leong K.C., Yang C.** 2008. Thermophysical and electrokinetic properties of nanofluids – A critical review. *Applied Thermal Engineering* **28**: 2109-2125.

- **Nguyen C.T., Desgranges F., Roy G. et al.** 2007. Temperature and particle-size dependent viscosity data for water-based nanofluids – Hysteresis phenomenon. *Int. J. Heat Fluid Flow* **28**: 1492–1506.
- **Ozerinc S., Kakac S., Yazicioglu A.G.** 2010. Enhanced thermal conductivity of nanofluids: a state-of-the-art review. *Microfluid. Nanofluid* **8**: 145-170.
- **Polidori G., Fohanno S., Nguyen C.T.** 2007. A note on heat transfer modelling of Newtonian nanofluids in laminar free convection. *Int. J. Thermal Sciences* **46**: 739-744.
- **Popa C., Fohanno S., Nguyen C.T., Polidori G.** 2010. On heat transfer in external natural convection flows using two nanofluids. *Int. J. Thermal Sciences* **49**: 901-908.
- **Wang X.-Q., Mujumdar A.S.** 2007. Heat transfer characteristics of nanofluids : a review. *Int. J. Thermal Sciences* **46**: 1-19.
- **Wen D., Lin G., Vafaei S., Zhang K.** 2009. Review of nanofluids for heat transfer applications. *Particuology* **7**: 141-150.