



AVERTISSEMENT

Ce document est le fruit d'un long travail approuvé par le jury de soutenance et mis à disposition de l'ensemble de la communauté universitaire élargie.

Il est soumis à la propriété intellectuelle de l'auteur. Ceci implique une obligation de citation et de référencement lors de l'utilisation de ce document.

D'autre part, toute contrefaçon, plagiat, reproduction illicite encourt une poursuite pénale.

Contact : ddoc-memoires-contact@univ-lorraine.fr

LIENS

Code de la Propriété Intellectuelle. articles L 122. 4

Code de la Propriété Intellectuelle. articles L 335.2- L 335.10

http://www.cfcopies.com/V2/leg/leg_droi.php

<http://www.culture.gouv.fr/culture/infos-pratiques/droits/protection.htm>



Master Mécanique, Energie, Produits et Procédés de
l'université de Lorraine.

Evaluation de l'intérêt énergétique des nanofluides dans l'usage des machines frigorifiques

Stage présenté par : Mathieu Bouton
Encadrants: Patrick Schalbart, Denis Leducq, Graciela Alvarez
Lieu du stage : Irstea - GPAN Bâtiment Kelvin – Antony (92)
Lieu de soutenance : Faculté des sciences de Nancy (54)
Le 04 septembre 2012

Remerciements

Je remercie tout l'Irstea de m'avoir accueilli pendant ces six mois au sein de l'équipe GPAN.

Je remercie tout particulièrement mon tuteur Patrick Schalbart pour m'avoir si bien conseillé et aidé pendant toute la durée du stage.

Je remercie Denis Leducq, Graciela Alvarez, Laurence Fournaison et les doctorants pour les discussions fructueuses sur les possibles pistes de réflexion pour le stage.

Je remercie toute l'équipe GPAN dans son ensemble pour leur bonne humeur, et les discussions qui m'ont permis de vite me sentir à l'aise dans l'environnement de l'Irstea.

Je remercie mes professeurs de l'université de Nancy pour leurs enseignements au cours de mon master.

Je remercie ma famille et Stephanie Casacci pour leur soutien pendant ce stage.

Résumé:

L'objectif de ce stage est d'évaluer l'intérêt potentiel des nanoparticules dans les systèmes de refroidissement des machines frigorifiques s'incluant dans le cadre du projet européen FRISBEE. Ces nanoparticules augmentent la conductivité thermique du fluide dans lequel elles sont en suspension, nous avons donc des échanges thermiques bien plus rapides qui provoquent une diminution de la puissance de pompage. Cette étude a permis de faire un point sur la littérature relatant de l'usage des nanofluides à basses températures (de 10 à -35°C) et le constat est qu'il y a très peu d'expériences menées actuellement dans ce domaine. En second lieu, une étude numérique permet de déterminer la performance des nanofluides par rapport aux fluides utilisés couramment, et d'en tirer ainsi un optimum en régimes laminaire et turbulent sur la concentration volumique à utiliser et sur le type de nanoparticule à employer. Avec ces optimums, nous pouvons évaluer les gains énergétiques associés aux nanofluides pour une entreprise. Enfin, une étude expérimentale a porté sur l'agrégation des nanoparticules pour voir combien de temps le nanofluide était stable.

Abstract : Evaluation of the interest of nanofluids in the use of refrigeration

The aim of this study is to evaluate the potential interest of nanofluids in the cooling systems including in the European project FRISBEE. This nanoparticles increase the thermal conductivity of the base fluid where they are in suspension, so we have faster thermal exchanges in order to decrease the pumping power. This study allowed to resume in the literature the using of nanofluids for lows temperatures (between 10°C and minus 35°C) and the conclusion is we have fews experimentations in this domain. To second, a numerical study allows to evaluate the nanofluid's performance versus base fluid's performance which are used in factory, and find an optimum of concentration and type of nanoparticles to use in laminar and turbulent. With this values, we can evaluate the energy savings for a company. To finish, an experimental study was made on the aggregation for see how much time the nanofluid was stable.

Mots clés : nanoparticules, refroidissement, agrégation, transfert thermique, puissance de pompage, débit massique, concentration volumique.

1	INTRODUCTION.....	- 9 -
2	NOMENCLATURE	- 10 -
3	UTILISATION DES NANOFLUIDES DANS LE DOMAINE DU FROID	- 11 -
3.1	ETUDES EXPERIMENTALES AVEC LES NANOFLUIDES	- 11 -
3.1.1	<i>Préparation des nanofluides et méthodes de mesures.....</i>	- 11 -
3.1.2	<i>Ecoulements et températures</i>	- 13 -
3.1.3	<i>Observation des résultats.....</i>	- 14 -
3.2	CORRELATIONS EMPLOYEES ET PROPOSEES.....	- 17 -
3.2.1	<i>Conductivité thermique</i>	- 17 -
3.2.2	<i>Coefficient d'échange thermique.....</i>	- 18 -
3.2.3	<i>Viscosité dynamique.....</i>	- 19 -
3.2.4	<i>Pertes de charges.....</i>	- 20 -
3.3	PERFORMANCE DES NANOFLUIDES	- 21 -
3.3.1	<i>Bilan sur les nanofluides.....</i>	- 21 -
3.3.2	<i>Les facteurs de mérite</i>	- 22 -
4	SIMULATION.....	- 25 -
4.1	DIMENSIONNEMENT DE L'ECHANGEUR	- 25 -
4.1.1	<i>Choix du système.....</i>	- 25 -
4.1.2	<i>Calculs préliminaires à la méthode NUT.....</i>	- 26 -
4.2	LANCEMENT DE LA SIMULATION	- 29 -
4.2.1	<i>Performance du fluide de base.....</i>	- 29 -
4.2.2	<i>Apport de Nanoparticules.....</i>	- 31 -
4.2.3	<i>Performance du nanofluide pour un débit massique constant.....</i>	- 32 -
4.3	SIMULATION POUR UNE PUISSANCE DE POMPAGE CONSTANTE	- 36 -
4.3.1	<i>Réévaluation des performances</i>	- 36 -
4.3.2	<i>Changement du système</i>	- 42 -
4.4	PUISSANCE THERMIQUE CONSTANTE	- 46 -
4.4.1	<i>Cas " Initial "</i>	- 46 -
4.4.2	<i>Cas 2 : " DeltaT = 20 "</i>	- 48 -
4.5	ETUDE ECONOMIQUE.....	- 50 -
5	EXPERIMENTATIONS ET RESULTATS.....	- 53 -
5.1	OBTENIR LE NANOFLUIDE.....	- 53 -
5.1.1	<i>Fournisseur</i>	- 53 -
5.1.2	<i>Prise de contact et de devis.....</i>	- 54 -
5.1.3	<i>Préparation du nanofluide</i>	- 54 -
5.2	PREPARATION DES ECHANTILLONS.....	- 55 -
5.2.1	<i>Sans surfactant.....</i>	- 55 -
5.2.2	<i>Avec surfactant.....</i>	- 56 -
5.3	EXPLOITATION DES ECHANTILLONS.....	- 57 -
5.3.1	<i>Analyse MET.....</i>	- 57 -
5.3.2	<i>Analyse MEB.....</i>	- 58 -
5.3.3	<i>Analyse PCS.....</i>	- 60 -
6	CONCLUSION.....	- 61 -
7	BIBLIOGRAPHIE	- 62 -
8	ANNEXES.....	- 65 -

1 Introduction

Depuis quelques années un nouveau type de fluide est en train d'émerger: le nanofluide. Le nanofluide est un fluide caloporteur tel que l'eau, l'eau glycolée, l'huile à qui l'on rajoute des nanoparticules de métal (Al, Cu, Ag, Au, etc.) ou d'oxyde métallique ou non-métallique (SiO_2 , Al_2O_3 , TiO_2), et autre (formes allotropiques du carbone) dans des quantités relativement faibles (0.1 à 6% du volume total). Pourquoi utiliser un nanofluide? Dans notre quête de performance des systèmes énergétiques, nous devons nous pencher sur l'optimisation qu'on doit effectuer sur les acteurs principaux des transferts thermiques à savoir les fluides. Ces nanofluides permettraient donc de pouvoir évacuer plus vite la chaleur émise par une machine frigorifique ou tout type d'installation industrielle nécessitant une évacuation importante de chaleur.

Choi fut le premier en 1998 à poser l'idée que le nanofluide transfère mieux la chaleur que le fluide de base, ceci grâce au fait que les nanoparticules de métal ont une conductivité thermique largement supérieure à celle du fluide. Cependant, l'ajout de ces nanoparticules affecte grandement la viscosité du fluide et par conséquent augmente les pertes de charges. Les nanoparticules peuvent également s'agglomérer entre elles et former un amas plus imposant diminuant la stabilité du mélange. Pour lutter contre cette agglomération nous utilisons un surfactant (tensioactif). On peut différencier les nanofluides par différents critères à savoir: taille et forme des nanoparticules, le type (métal ou oxyde métallique) et sa concentration, le surfactant utilisé ainsi que sa concentration dans le nanofluide, la méthode de préparation du nanofluide.

Dans le cadre de ce stage, nous avons décidé de rassembler les différents articles d'équipes scientifiques sur les caractéristiques des nanofluides pour des températures en-dessous de l'ambient, et confronter leurs conclusions afin de savoir quelles expériences pourraient nous permettre de faire progresser l'usage des nanofluides dans le monde du froid. Une fois cette prise de connaissances effectuée, on procédera à une simulation sous Matlab afin de pouvoir évaluer et comparer les performances des nanofluides par rapport au fluide de base dans un échangeur tubulaire. Nous avons différents cas d'études tels que l'étude à débit massique constant, puissance de pompage constante et puissance thermique constante. Dans le cas de la puissance thermique constante, nous y ajouterons une étude économique pour savoir si le coût des nanofluides est amorti ou non au fil du temps et de la demande. Pour finir, nous avons mené une expérimentation sur la vitesse d'agglomération des nanofluides grâce à des études sous microscopie électronique et laser. Ceci suggère de se fournir en nanofluide et en surfactant. L'observation en microscope ou au laser s'est effectuée dans d'autres laboratoires possédant le matériel adéquate et qui ont accepté de nous louer leur service.

2 Nomenclature

Nomenclature	subscript
C_p capacité calorifique massique $J.kg^{-1}.K^{-1}$ d diamètre moyen des nanoparticules nm e épaisseur de la plaque m g coefficient de gravitation $N.kg^{-1}$ K indice de consistance de l'écoulement $Pa.s^n$ k conductivité thermique $W.m^{-1}.K^{-1}$ k_H coefficient d'Huggins L_{ch} longueur des microcanaux L longueur de l'échangeur tubulaire $\dot{m}$ débit massique $kg.s^{-1}$ n indice de comportement de l'écoulement q puissance électrique $W.m^{-1}$ r rapport d'aspect des nanoparticules Re Nombre de Reynolds S_x surface d'échange m^2 S section de passage m^2 T température K. t température °C. V vitesse du nanofluide $m.s^{-1}$ $\dot{V}$ débit volumique $m^3.s^{-1}$ ΔH pertes de charges m . ΔP perte de pression en Pa ϕ concentration volumique en nanoparticules. β fraction du liquide parcourue par une nanoparticule ρ densité $kg.m^{-3}$ κ constante de Boltzmann $=1,381 \times 10^{-23} J.K^{-1}$ χ_c puissance thermique de la boucle centrale (nanofluide) $W.m^{-2}$ μ viscosité dynamique $Pa.s$ η viscosité intrinsèque $m^2.s^{-1}$ $\dot{\gamma}$ vitesse de cisaillement s^{-1} τ contrainte de cisaillement Pa	nf nanofluide f fluide de base s nanoparticule ns sortie nanofluide boucle ce entrée boucle chaude ne entrée nanofluide boucle cs sortie boucle chaude

3 Utilisation des nanofluides dans le domaine du froid

3.1 Etudes expérimentales avec les nanofluides

3.1.1 Préparation des nanofluides et méthodes de mesures

Une revue bibliographique de la littérature montre que les équipes scientifiques utilisent des nanofluides déjà préparés par des fabricants privés. Les différents types de nanofluides utilisés sont récapitulés dans le Tableau 1 en fonction de la taille des nanoparticules, des concentrations utilisées et du pourcentage en surfactant s'il y en a. Même si les études publiées concernent les nanofluides disponibles sur le marché, leurs caractéristiques sont assez diversifiées, aussi bien sur la taille que sur la méthode de préparation.

Il est à noter que toutes les nanoparticules présentées sont de formes sphériques sauf les nanotubes de carbones :

Auteurs	Fluide Porteur	Nanoparticule	Taille	Fraction volumique	surfactant
(Aladag et al., 2012)	Eau	CNT	L=200µm et D=9 nm	1%	1%
		Al ₂ O ₃	D = 30 nm	1%	1%
(Asirvatham et al., 2009)	Eau	CuO	D = 40 nm	3%	
(Duangthongasuk and Wongwises, 2009)	Eau	TiO ₂	D = 21 nm	0,2 à 2%	
(Ho et al., 2010)	Eau	Al ₂ O ₃	D = 33 nm	1 et 2%	
(Kole and Dey, 2011)	Huile d'engrenage	CuO	D = 40 nm	0.5 à 2.5%	acide oleic
(Kulkarni et al., 2007a)	Eau Glycolée (40/60)	CuO	D = 29 nm	0;1; 2; 4; 5; 6 %	
(Kulkarni et al., 2007b)	Eau Glycolée (40/60)	Al ₂ O ₃	D = 20; 50; 100 nm	2; 4; 6 %	
		SiO ₂	D = 20; 50; 100 nm	2; 4; 6 %	
		CuO	D = 20; 50; 100 nm	2; 4; 6 %	
(Kulkarni et al., 2009)	Eau Glycolée (40/60)	Al ₂ O ₃	D = 45 nm	2; 4; 6 %	
		SiO ₂	D = 45 nm	2; 4; 6 %	
		CuO	D = 45 nm	2; 4; 6 %	

(Longo and Zilio, 2011)	Eau	Al ₂ O ₃	D = 285 et 165 nm	1 à 4%	0%
		TiO ₂	D = 220 et 155 nm	1 à 6%	0%
(Maré et al., 2011)	Eau Déminéralisée	Al ₂ O ₃	D = 37 nm	1%	
		CNT	D = 9 nm et L = 2µm	0,55%	
(Namburu et al., 2007)	Eau Glycolée (40/60)	CuO	D = 29 nm	1; 2; 3; 4; 5; 6,12%	
(Namburu et al., 2008)	Eau Glycolée (40/60)	CuO	D = 29 nm	1; 2; 3; 4; 5; 6%	
		SiO ₂	D = 20; 50; 100 nm	6%	
		Al ₂ O ₃		6%	
(Sahoo et al., 2009)	Eau	Al ₂ O ₃	D = 53 nm	1; 2; 4; 6; 10%	
(Zhang et al., 2007)	Toluène	Au	D = 1,65 nm	0,3%	
	Eau distillée	Al ₂ O ₃	D = 20 nm	1 à 10%	
		TiO ₂	D = 40 nm	0.5 à 3%	
		CuO	D = 33 nm	1 à 10%	0%
		CNT	L = 10µm et d = 150 nm	0.1 à 1%	1.5% de SDS

Tableau 1: récapitulatif des nanofluides employés

Comme on peut le constater, l'oxyde d'aluminium est utilisé dans huit articles et l'oxyde de cuivre quant à lui est utilisé dans sept articles, ce qui peut s'expliquer par la facilité d'approvisionnement pour ces deux matériaux. En effet, la production de ces nanofluides est assez bien maîtrisée par rapport à d'autres comme les nanotubes de carbones CNT (problème d'agglomération). En revanche, il y a très peu d'informations sur les surfactants utilisés. Nous avons uniquement quelques données sur le fait qu'on en ait au maximum 1% et qu'ils ont une faible influence sur la viscosité du nanofluide (d'après les fournisseurs). Ensuite, on peut remarquer que les concentrations en nanofluide sont assez proches mais jamais les mêmes et ceci a son importance dans la comparaison des résultats. Nous avons pu constater que pour certains nanofluides, tels que les nanotubes de carbone, une différence de concentration de 0,1% pouvait entraîner des modifications importantes des propriétés du fluide.

Cependant, un autre paramètre qui n'a pas encore été cité peut jouer un rôle essentiel dans la performance des nanofluides. Il s'agit de leur méthode de préparation. Pour la plupart, ils sont fabriqués avec la méthode en deux étapes qui consistent à obtenir les nanoparticules sous forme de poudre puis à les disperser dans le fluide de base ((Kulkarni et al., 2009), (Longo and Zilio, 2011), (Ho et al., 2010), (Zhang et al., 2007)). Seulement, comme les

nanofluides sont fabriqués par des sous-traitants, ils n'ont pas forcément la concentration en nanoparticules souhaitée. Dans ce cas on constitue des échantillons où l'on dilue le nanofluide reçu afin d'avoir les concentrations voulues. Par la suite, les équipes décident de s'assurer de la bonne répartition des nanoparticules dans le mélange, soit par une agitation mécanique plus ou moins longue mais d'environ 1h ((Longo and Zilio, 2011),(Namburu et al., 2007)) et/ou un bombardement à l'ultrason d'en général 25kHz sur 2 ou 48h ((Duangthongsuk and Wongwises, 2009), (Ho et al., 2010), (Longo and Zilio, 2011), (Maré et al., 2011), (Sahoo et al., 2009)). Cela a pour but de pouvoir préparer soi-même les échantillons et ainsi s'assurer qu'il n'y a plus ou presque plus d'agglomérats.

Par la suite, une fois le mélange effectué en laboratoire, les équipes scientifiques décident de mesurer la taille des nanoparticules pour prévenir des agglomérats qui ont pu se former avant, pendant et après les expériences. Lorsque la méthode est citée dans les articles, nous retrouvons toujours la même : il s'agit de la méthode Dynamic Light Scattering (DLS) avec un Zetasizer Nano S ou ZS. Elle fait appel à un laser qui peut mesurer des tailles de nanoparticules allant jusqu'à 10 nm. Ainsi, avec cet appareil, nous pouvons avoir une taille moyenne des nanoparticules qui en général est bien plus élevée que celle donnée par le fournisseur.

Une autre méthode pour évaluer la taille des nanoparticules est la microscopie électronique en transmission (TEM). En effet, le nanofluide (environ 3 μ L) est placé sur une grille puis par bombardement d'électrons nous observons la taille des nanoparticules((Asirvatham et al., 2009),(Duangthongsuk and Wongwises, 2009) et Annexe 11).

3.1.2 Ecoulements et températures

Le dernier point à étudier avant de passer à l'analyse des résultats est le régime et la gamme de températures. Les articles situent les expériences dans le froid négatif, mais la gamme reste assez vaste : de -35°C à presque 50°C . Il est donc important d'énumérer avec exactitude les températures auxquelles les expériences se déroulent puisqu' à première vue un paramètre clé des nanofluides, à savoir la viscosité, y est très sensible. Nous avons également fait un récapitulatif sur les régimes d'écoulements (laminaire ou turbulent).

Comme on le voit dans le Tableau 2, la gamme de température est très étendue : cela est un avantage car ceci nous permet d'avoir un aperçu de ce qui se produit à certaines températures comme à -35°C. Seulement, le point négatif est que les articles présentant des travaux à températures inférieures à 0°C proviennent du même laboratoire de l'université de Fairbanks en Alaska. Ainsi, il n'y a pas d'autres laboratoires à ce jour ayant fait des expériences de ce même type sachant que le fluide de base est constitué à 60% d'éthylène de glycol et à 40% d'eau (ce fluide de base n'a jamais été utilisé ailleurs dans ces proportions-là). Dans ce cas, il est difficile de prendre du recul sur les résultats donnés. En revanche, plusieurs travaux existent pour les températures allant de 1 à 20°C.

	Laminaire	Turbulent	Gamme de T
(Aladag et al., 2012)	X	-	2 à 10°C
(Asirvatham et al., 2009)	X	-	10 à 17°C
(Duangthongsuk and Wongwises, 2009)	X	-	15 à 35°C
(Ho et al., 2010)	X	-	20 à 40°C
(Kole and Dey, 2011)	X	-	10 à 80°C
(Kulkarni et al., 2007a)	X	-	-35°C à 50°C
(Kulkarni et al., 2007b)	X	X	-35°C à 50°C
(Kulkarni et al., 2009)	X	X	-35°C à 50°C
(Longo and Zilio, 2011)	X	X	1 à 40°C
(Maré et al., 2011)	X	-	2 à 10°C
(Namburu et al., 2007)	X	-	-35°C à 50°C
(Namburu et al., 2008)	X	X	-35°C à 50°C
(Sahoo et al., 2009)	X	-	-35°C à 50°C
(Zhang et al., 2007)	X	-	5 à 50°C

Tableau 2: régime et gamme de température

3.1.3 Observation des résultats

A présent, nous allons faire un état des lieux des différents résultats observés lors des expériences faites. Pour ce faire, nous allons procéder selon les paramètres clés : la viscosité, la conductivité, la perte de charges et le coefficient de transfert thermique.

3.1.3.1 Impact sur la viscosité et les pertes de charges

Chaque article a relevé le fait qu'en basse température la viscosité augmente de façon exponentielle par rapport au fluide de base mais qu'elle tend à se stabiliser et à se rapprocher de la viscosité du fluide de base pour des températures supérieures à 10°C (Annexe 1). Les auteurs ont également deux manières différentes pour analyser la viscosité:

-Soit en mesurant directement la viscosité du nanofluide et la comparer avec celle du fluide de base ((Kulkarni et al., 2007a), (Namburu et al., 2007)).

-Soit en faisant le ratio de la viscosité du nanofluide sur celle du fluide de base et observer l'évolution de ce dernier en fonction de la température ou de la vitesse de cisaillement ((Longo and Zilio, 2011), (Zhang et al., 2007)).

Selon les types de nanofluides utilisés (fluide de base et nanoparticules), il y a de nouvelles corrélations proposées afin de prévoir le comportement de la viscosité dans cette gamme de température.

Il faut prendre en considération le fait que les pertes de charges augmentent avec la viscosité, cela influence donc la puissance de pompage et le débit à fournir pour avoir des performances supérieures au fluide de base. Les pertes de charges augmentent avec la concentration et avec la taille des nanoparticules. Les pertes de charges sont beaucoup plus importantes selon Maré et al. (2011) avec un ratio d'augmentation de 3 pour Al_2O_3 et de 7 pour CNT (par rapport au fluide de base).

Exemple: pour $Re = 8000$, on a $\Delta P(CuO) = 950kPa$, $\Delta P(Al_2O_3) = 620kPa$, $\Delta P(SiO_2) = 430kPa$, $\Delta P(fluid_base) = 360kPa$ (Kulkarni et al., 2007b). Les pertes de charges sont bien plus élevées pour les nanofluides au vue de ces résultats expérimentaux.

3.1.3.2 Impact sur la conductivité thermique

Comme pour la viscosité, le fait d'augmenter la concentration en nanoparticules augmente la conductivité thermique. Elle augmente de manière plus ou moins rapide selon les nanoparticules utilisées. Les articles ne s'attardent pas à faire des expérimentations sur ces augmentations puisque beaucoup d'autres articles en parlent déjà (principalement pour les études à température ambiante). Il y a deux cas de figures pour analyser l'augmentation de la conductivité:

- Comparaison directe des valeurs de conductivité du nanofluide et du fluide de base (Ho et al., 2010).

- Comparaison par le biais d'un calcul du ratio de la conductivité du nanofluide sur celle du fluide de base pour différentes températures et concentrations données ((Namburu et al., 2007).

En résumé, la conductivité semble avoir une faible sensibilité à la température.

3.1.3.3 Coefficient d'échange thermique en régime laminaire et turbulent

Voici une présentation des travaux effectués sur le coefficient d'échange, h . Nous procéderons à la mise en forme d'un tableau pour le cas laminaire (Tableau 3) et d'un autre pour le cas turbulent (Tableau 4).

On constate à l'instar de la conductivité thermique que le coefficient de transfert thermique augmente fortement lorsque la concentration en nanoparticules dans le fluide de base augmente. Ceci est normal étant donné que le coefficient de transfert thermique est dépendant de la conductivité thermique.

*Laminaire:

	Coefficient d'échange thermique h
(Asirvatham et al., 2009)	Les résultats ont montré une augmentation de h de 8% par rapport au fluide de base, mais h augmente plus vite lorsque Re varie. Pour $Re = 1350$ et $q'' = 7960 \text{ W.m}^{-2}$ On a $T=10^{\circ}\text{C}$ $h(\text{Eau}) = 520 \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$ et $h(\text{CuO}) = 600 \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$ On a $T=17^{\circ}\text{C}$ $h(\text{Eau}) = 880 \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$ et $h(\text{CuO}) = 1025 \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$
(Kulkarni et al., 2007b)	Les expériences montrent que h augmente en régime laminaire et turbulent. Par exemple pour SiO_2 à concentration de 6% et une taille de 45 nm, nous avons à $Re = 8000$ une augmentation de 54%
(Kulkarni et al., 2009)	Augmentation de h en régime laminaire. Notons que les résultats sont exploités pour le régime turbulent mais dans ces deux régimes les comparaisons sont faites à Re constant. Exemple: pour $Re = 1000$, on a h (fluide de base) = $150 \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$, h (CuO à 2%) = $3200 \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$
(Maré et al., 2011)	L'évolution de h en fonction du nombre de Reynolds ne varie pas beaucoup pour les deux nanofluides (ratio entre 1.6 et 1.4), mais Re varie de 50 à 250. Apparemment, CNT (+150%) est mieux qu'Al_2O_3 (+22%) du moins pour les faibles Re en terme d'augmentation de h. Le débit reste le même pour le fluide de base et les nanofluides.

Tableau 3: coefficient de transfert thermique en régime laminaire

*Turbulent:

	Coefficient d'échange thermique h
(Kulkarni et al., 2009)	Pour $Re=8000$, le nanofluide CuO augmente h comme ceci: 6% -> augmentation de h de 61% ,4% -> augmentation de h de 37.5%, 2% -> augmentation de h de 16.7%. En comparant avec les autres couples mis en jeu à concentration de 6% et $Re = 8000$: CuO -> augmentation de h de 61% Al_2O_3-> augmentation de h de 35.4% SiO_2-> augmentation de h de 18.4%
(Namburu et al., 2008)	Il est remarqué que h augmente proportionnellement avec Nusselt et Reynolds. Pour un $Re = 20000$ pour 6% en concentration de CuO h augmente de 1.75 par rapport à celui du fluide de base.

Tableau 4: coefficient de transfert thermique en régime turbulent

3.2 Corrélations employées et proposées

3.2.1 Conductivité thermique

La plupart des auteurs se servent de l'équation de Maxwell pour calculer la conductivité. Par la suite, en fonction de certaines réévaluations faites par d'autres auteurs tels que Choi ou Koo, ils font évoluer cette formule de base vers un modèle qui semble plus juste vis-à-vis du comportement du nanofluide. Cependant, il n'y a que chez Longo and Zilio (2011) que le mouvement Brownien est pris en compte dans l'évaluation de la conductivité (équation 3 du Tableau 5). En fait, la communauté scientifique est encore assez perplexe à propos de l'influence du mouvement Brownien sur les propriétés des nanofluides.

Nous allons donc faire un récapitulatif des différentes corrélations utilisées lors des calculs de la conductivité thermique:

	Conductivité thermique	Articles
Equation 1 (Hamilton–Crosser)	$k_{nf} = k_f \left[\frac{k_s + (n-1)k_f - (n-1)\phi(k_f - k_s)}{k_s + (n-1)k_f + \phi(k_f - k_s)} \right]$	(Maré et al., 2011), (Sahoo et al., 2009)
Equation 2 (maxwell)	$k_{nf(max\ well)} = k_f \left[\frac{(k_s + 2k_f + 2(k_s - k_f)\phi)}{k_s + 2k_f - 2(k_s - k_f)\phi} \right]$	(Longo and Zilio, 2011)
Equation 3 (Koo and Kleinstreuer)	$k_{nf} = k_{nf(max\ well)} + 5 \times 10^4 * \beta * \phi * \rho_f * C_{p_f} \left[\frac{\kappa T}{\rho_s d_s} \right]^{1/2} * f$ Avec: $\beta = 8,4407(100\phi)^{-1,017304} \text{ (for } Al_2O_3 \text{)}$ $f(T, \phi) = (2,8217 \times 10^{-2} \phi + 3,917 \times 10^{-3}) \frac{T}{273,15} + (-3,0669 \times 10^{-2} \phi - 3,91123 \times 10^{-3})$	(Longo and Zilio, 2011)
Equation 4 (Choi et Yu)	$k_{nf} = k_f \left[\frac{k_s + 2k_f + 2(k_s - k_f)(1 + \delta)^3 \phi}{k_s + 2k_f - (k_s - k_f)(1 + \delta)^3 \phi} \right]$ Avec $k_f = 0,5473 + 2,14 \times 10^{-3} t - 9,6737 \times 10^{-6} t^2$ Avec $\delta = 0,1$	(Kulkarni et al., 2009)
Equation 5	$k_{nf} = k_f \left[\frac{2k_f + k_s + 2\phi(k_s - k_f)}{2k_f + k_s - \phi(k_s - k_f)} \right]$	(Longo and Zilio, 2011), (Maré et al., 2011)
Equation 6	$k_{nf} = \frac{1}{4} [(3\phi - 1)k_s + (2 - 3\phi)k_f + \frac{k_f}{4} \sqrt{\Delta}]$ Avec $\Delta = [(3\phi - 1)^2 (k_s/k_f)^2 + (2 - 3\phi)^2 + 2(2 + 9\phi - 9\phi^2)(k_s/k_f)]$	(Maré et al., 2011)
Equation 7 (Timofeeva)	$k_{nf} = [1 + 3\phi]k_f$	(Maré et al., 2011)

Equation 8 (avec la sonde courte à fil chaud)	$knf = \frac{q}{4\pi(T_2 - T_1)} \ln\left(\frac{t_1}{t_2}\right)$ Avec T2-T1 l'élévation de température du fil entre les temps t1 et t2.	(Maré et al., 2011), (Sahoo et al., 2009)
--	---	---

Tableau 5 : corrélations sur la conductivité thermique

3.2.2 Coefficient d'échange thermique

Le coefficient de transfert thermique h est un autre paramètre très important que nous avons à identifier. Selon les articles, il est évalué de différentes manières mais ce qu'on peut remarquer c'est qu'il n'y a que Longo and Zilio (2011) et Ho et al (2010) qui utilisent une corrélation pour calculer h à partir du Nusselt (Tableau 6), les auteurs restants ((Asirvatham et al., 2009), (Kulkarni et al., 2007b)) utilisent l'équation de bilan suivante :

$$h_{nf} = \frac{q''}{t_w - t_u}$$

Avec

q'' : chaleur fournie au tube d'essai

T_w : température moyenne du wall

T_u : température moyenne entre entrée et sortie

	Coefficient de transfert thermique	Articles
Equation 1	$h_{nf} = \frac{1}{\left(\frac{S_x \Delta T_{LM}}{\chi_c} - \frac{1}{h_f} - \frac{e}{k}\right)}$ Avec: $h_f = \frac{Nuk_f}{D_h} \text{ et } D_h = \frac{4S}{p}$ $\Delta T_{LM} = \frac{(Tns - Tce) - (Tne - Tcs)}{\ln\left(\frac{Tns - Tce}{Tne - Tcs}\right)}$ $Nu = 0,455 Re^{0,66} Pr^{\frac{1}{3}}$	(Ho et al., 2010)
Equation 2	$\bar{h} = \dot{m}^{1/3} cp^{1/3} k^{2/3} D_h^{-1} Lch^{-1/3} \left(\frac{\mu}{\mu_s}\right)^{0,14}$ Avec : $\overline{Nu} = 1,86 \left(\frac{Re Pr}{L_{ch}/D_h}\right)^{1/3} \left(\frac{\mu}{\mu_s}\right)^{0,14}$	(Longo and Zilio, 2011)

Tableau 6: corrélation du coefficient d'échange thermique

Il est difficile de pouvoir faire une comparaison des différentes formules trouvées. Cependant, la méthode de calcul reste toujours du même type: connaître les températures d'entrées et de sorties puis, en fonction des données et caractéristiques de l'expérience, on trouve Reynolds et Prandtl suivi du Nusselt et enfin h. Néanmoins le calcul du coefficient de transfert ne posera pas réellement de problèmes puisque sa détermination dépendra principalement de notre mode opératoire d'expérience et surtout des hypothèses (par exemple : prise en compte du mouvement brownien) faites sur les échanges thermiques.

3.2.3 Viscosité dynamique

En général, la conductivité thermique et le coefficient de transfert thermique du nanofluide sont bien supérieurs à ceux du fluide de base. Cette augmentation est justement très recherchée contrairement à celle d'autres paramètres tels que la viscosité dynamique et les pertes de charges (chute de pression). Ces augmentations ne sont pas désirées car elles viennent diminuer l'intérêt de l'usage des nanofluides. Pour comprendre ce phénomène, les auteurs ont porté une attention particulière aux corrélations utilisées pour évaluer la viscosité (Tableau 7).

	Viscosité dynamique	Articles
Equation 1 (Einstein, pour $\phi < 1\%$)	$\mu_{nf} = \mu_f (1 + 2,5\phi)$	(Aladag et al., 2012), (Asirvatham et al., 2009), (Kole and Dey, 2011), (Longo and Zilio, 2011)
Equation 2 (Brinkman, pour $\phi < 4\%$)	$\mu_{nf} = \mu_f \left[\frac{1}{(1 - \phi)^{2,5}} \right]$	(Aladag et al., 2012), (Duangthongsuk and Wongwises, 2009), Zhang – 2007
Equation 3 (Batchelor tenant compte du mvt Brownien)	$\mu_{nf} = \mu_f (1 + \eta\phi + k_H\phi^2 + \dots)$ Avec $\eta = 2,5$ et $k_H = 6,5$ car les nanoparticules étudiées sont sphériques	(Aladag et al., 2012), (Duangthongsuk and Wongwises, 2009)
Equation 4 (Brenner, si les particules ne sont pas sphériques)	$\mu_{nf} = \mu_f (1 + \eta\phi)$ Avec $\eta = \frac{0,312r}{\ln 2r - 1,5} + 2 - \frac{0,5}{\ln 2r - 1,5} - \frac{1,872}{r}$	(Aladag et al., 2012)
Equation 5 (proposée si le fluide est newtonien)	$\tau = \mu_{nf} \dot{\gamma}$	(Aladag et al., 2012), (Sahoo et al., 2009)
Equation 6 (proposé si le fluide est non newtonien)	$\tau = K \dot{\gamma}^n$	(Aladag et al., 2012)
Equation 7 (proposée pour TiO_2/Eau)	$\frac{\mu_{nf}}{\mu_f} = (a + b\phi + c\phi^2)$ Avec a, b et c des constantes évaluées pour 3 températures : 15, 25, 35°C.	(Duangthongsuk and Wongwises, 2009)
Equation 8 (proposée par Sahoo et al (2009))	$\mu_{nf} = Ae^{(B/T+C\phi)}$ où A, B et C sont des constantes déterminées chacune dans les cas basses températures ($>0^\circ\text{C}$) et hautes températures ($<0^\circ\text{C}$).	(Sahoo et al., 2009), (Kole and Dey, 2011)
Equation 9 (proposée par Namburu et al (2007))	$\text{Log}(\mu_{nf}) = Ae^{-BT}$ Avec	(Namburu et al., 2007), (Kole and Dey, 2011)

pour SiO ₂ /EG(40/60)	$A = 1,8375\phi^2 - 29,643\phi + 165,56$ $B = 4 \times 10^{-6} \phi^2 - 0,001\phi + 0,0186$ Pour $\phi = [0; 6.12\%]$	
Equation 10 (proposée par Kulkarni et al (2007a))	$\mu_{nf} = Ae^{B\phi}$ Avec $\ln(A) = 736,9e^{-0,0199T}$ et $B = 44,794 - 0,0765T$	(Kulkarni et al., 2007a)

Tableau 7 : corrélations portant sur la viscosité

La viscosité se calcule essentiellement à partir de la formule d'Einstein. Ceci vient du fait que, dans la plupart des articles, on utilise de faibles concentrations en nanoparticules à cause du coût de production. Cependant, il ne semble pas qu'il existe de corrélation admise pour évaluer la viscosité avec une concentration en nanoparticule supérieure à 4%. En conclusion, la viscosité est calculée de la même manière pour tous les auteurs.

3.2.4 Pertes de charges

Finalement, la question des pertes de charges est assez peu explicitée en termes de corrélation comme le montre le Tableau 8:

	Pertes de charges	Articles
Equation 1 (évaluation pertes de charges en fonction de la puissance de pompage)	$W = \frac{\dot{Q}_{nf} \Delta P}{\eta_{pump}}$ Avec η_{pump} l'efficacité de la pompe.	(Kulkarni et al., 2009)
Equation 2	$\Delta H = \lambda \frac{LV^2}{D_h 2g} + K \frac{V^2}{2g}$	(Maré et al., 2011)
Equation 3	$\Delta P = \Delta P_{measured} - (Kc + Ke) \frac{\rho V^2}{2}$ Kc et Ke sont les coefficients de pertes vis-à-vis de la contraction en entrée et de l'expansion en sortie.	(Ho et al., 2010)

Tableau 8 : corrélation sur les pertes de charges

Avant toute chose, il est important de noter que les coefficients Kc et Ke sont des coefficients trouvés par Lee en 2007 dans un article de transfert de chaleur de nanofluide dans des microcanaux mais à une température de 30°C. Par la suite, on admettra que les corrélations des pertes de charges pour les nanofluides sont assez proches voire les mêmes que pour le fluide de base. La plupart des articles se sont contentés d'une simple mesure de la perte de pression dans leurs expériences et ont ensuite reporté les résultats dans des corrélations déjà existantes. Même si ce genre de pratique est fréquent, il est fort probable que les auteurs ne prennent pas en compte certains facteurs qu'on trouve chez les nanofluides et non chez le fluide de base, tels que le mouvement brownien ou l'agglomération des nanoparticules. Il semblerait que la mesure de pertes de pression dans les tubes (ou plaques) où circulent les nanofluides suffise à satisfaire les auteurs, considérant alors que tous ces nouveaux paramètres y sont intégrés.

3.3 Performance des nanofluides

3.3.1 Bilan sur les nanofluides

Après avoir étudié les différents résultats donnés par ces articles, nous allons maintenant faire le bilan sur la viabilité ou non des nanofluides utilisés (Tableau 9). Tout d'abord, les différents auteurs sont tous d'accord sur le fait que les nanofluides augmentent de manière considérable le transfert thermique ainsi que la viscosité. La plus importante information à retenir réside dans le fait que le nanofluide ayant pour base Al_2O_3 est pour le moment favori comme remplaçant de l'eau ou eau glycolée dans les échanges thermiques au vu des différentes conclusions et résultats observés par les auteurs.

Nanofluide	Avantages	Inconvénients
Al_2O_3	-réduit fortement la puissance de pompage (-38% pour 6% en concentration (Kulkarni et al., 2009)). -viscosité diminue en augmentant la température -Le mélange est stable et les agglomérats sont bien moins nombreux ((Maré et al., 2011), Ho et al – 2010). -Réduit beaucoup le débit massique (-28% (Kulkarni et al., 2009)) -augmente le transfert thermique ((Longo and Zilio, 2011), (Ho et al., 2010)) -augmente la conductivité thermique (+23% (Longo and Zilio, 2011))	-la viscosité augmente en baissant en température (à -35°C elle est au double du fluide de base (Kulkarni et al., 2007b)). -Les résultats d'augmentation sont plus notables à forte concentration d'où un prix plus élevé.
SiO_2	-réduit la puissance de pompage (-27.6% (Kulkarni et al., 2009)) -fabrication maîtrisée -réduit le débit massique (-16.3% (Kulkarni et al., 2009)) -augmente le transfert thermique (+18.4% (Kulkarni et al., 2009)) -augmente la conductivité thermique	-augmentation des pertes de charges(Kulkarni et al., 2007b). -augmentation de la viscosité (à -35°C elle est multiplié par 1.5 (Kulkarni et al., 2009)) -La viscosité varie en fonction de la taille des nanoparticules : plus les particules sont petites plus la viscosité est grande (Namburu et al., 2008)
TiO_2	-réduit la puissance de pompage -augmente la conductivité thermique (16% (Longo and Zilio, 2011)) -ramène à des résultats presque identiques à Al_2O_3	-augmente la viscosité (+ 150% (Longo and Zilio, 2011))
CNT	-augmente considérablement la conductivité thermique (Maré et al., 2011) -augmente le transfert thermique (+150%) -facile à produire.	-augmente beaucoup les pertes de charges (multipliées par 7 (Maré et al., 2011)) -augmente considérablement la viscosité (multipliée par 4.5) -grande instabilité

CuO	-diminue la puissance de pompage (-11.7%) -diminue le débit massique (-6.5% (Asirvatham et al., 2009)).	-Pas de réel constat d'inconvénients sauf qu'il est moins performant en termes de réduction de débit massique et de puissance de pompage. - Plus la concentration en nanoparticules augmente, plus la viscosité augmente (multipliée par 8 entre 0 et 6,12%) (Namburu et al., 2008), (Kulkarni et al., 2007b) (Kole and Dey, 2011)
Cu	-augmente le transfert thermique. -Pas d'informations supplémentaires précises si ce n'est qu'il se comporte de la même manière que CuO aussi bien pour les avantages qu'inconvénients malgré qu'il semble moins performant.	

Tableau 9 : avantages et inconvénients des nanofluides

Certes, les auteurs ont constaté également que le nanofluide à base d'Al₂O₃ n'est pas celui qui transfère mieux la chaleur. Il est de loin devancé par les nanotubes de carbones qui transfèrent deux à trois fois mieux la chaleur. Mais, l'inconvénient majeur des nanotubes est leur instabilité en suspension : des agglomérats apparaissent rapidement, ce qui augmente la viscosité entraînant ainsi une augmentation de la puissance de pompage. Les auteurs ont donc trouvé juste de sélectionner le nanofluide qui amène à la meilleure réduction de consommation d'énergie à savoir Al₂O₃.

3.3.2 Les facteurs de mérite

3.3.2.1 Le PEC

L'ingénieur recherche un nanofluide performant lui permettant d'améliorer considérablement les échanges thermiques au sein d'une installation industrielle. Son critère de performance pour un nanofluide peut s'évaluer à l'aide du PEC (Coefficient de Performance Energétique) qui s'écrit de la manière suivante:

$$PEC = \frac{\dot{m}C_p(T_s - T_e)}{\dot{V}\Delta P}$$

Avec $\dot{m}$ Le débit massique en $kg.s^{-1}$

$\dot{V}$ Le débit volumique en $m^3.s^{-1}$

T_e Température d'entrée de l'échangeur

T_s Température de sortie de l'échangeur

ΔP Perte de pression en Pa

Le PEC recherche donc le rapport entre la puissance thermique échangée avec le fluide et la puissance de pompage requise pour traverser l'échangeur. Cependant, les différentes évaluations faites à partir de ce PEC décrivent les nanofluides comme moins performants, du point de vue énergétique, que les fluides de base. Même si l'échange thermique est augmenté, la puissance de pompage supplémentaire dévalue la performance du nanofluide comme le suggèrent Gruss et Ribiero (2009). Pour eux, les nanofluides sont donc très utiles si nous sommes une entreprise peu regardante sur la dépense énergétique et très axée sur le transfert

thermique. Cependant d'autres articles comme ceux de Ferrouillat et al (2010 et 2011) prouvent le fait que le PEC d'un nanofluide s'améliore avec l'augmentation du facteur de forme des nanoparticules. Dans les articles cités, excepté celui de Kulkarni et al (2009), nous ne trouvons pas la totalité des données nécessaires à l'évaluation du PEC. Aussi, il a été possible de faire un calcul de PEC à partir des résultats expérimentaux d'un seul article (Kulkarni et al., 2009) dont les calculs sont présentés dans le Tableau 10. Il est à noter que les calculs se basent sur une puissance thermique constante tout au long des expériences.

Nanofluide	$\dot{m}$ (kg/s)	$\dot{V}$ (m ³ /s)	Te (K)	Ts (K)	ΔP (Pa)	ρ (kg / m ³)	C_p (J / kg.K)	PEC	ratio PEC	$\dot{Q}$ (W)	$\dot{W}$ (W)
EG	2,76E-02	2,66E-05	238,15	248,15	346000	1038	3120	93,6	1,00	861	9,20
CuO	2,58E-02	1,89E-05	238,15	252	430000	1366	2339	106,0	1,13	861	8,13
AL ₂ O ₃	1,99E-02	1,67E-05	238,15	254	340000	1192	2718	151,7	1,62	861	5,68
SiO ₂	2,31E-02	2,07E-05	238,15	251	322000	1116	2821	129,2	1,38	861	6,67

Tableau 10 : évaluation du PEC

A l'issue de ce calcul, les PEC des nanofluides sont supérieurs à celui du fluide de base. Or les calculs effectués par Gruss and Ribiero (2009) montrent que le PEC d'un nanofluide est inférieur à celui du fluide de base. Il n'y a donc pas d'accord sur ce sujet, ce qui doit faire l'objet d'une étude plus approfondie.

3.3.2.2 Autres facteurs de mérite

Il existe dans la littérature une autre corrélation pour évaluer la performance d'un nanofluide par rapport au fluide de base. Il s'agit d'une corrélation qui vise à comparer le ratio d'augmentation de la conductivité thermique avec le ratio d'augmentation de la viscosité (Prasher et al., 2006) :

$$\frac{\mu_{nf}}{\mu_f} = 1 + C_\mu \phi \quad \text{et} \quad \frac{k_{nf}}{k_f} = 1 + C_k \phi \quad \Rightarrow \quad \frac{C_\mu}{C_k} < 4$$

Cette corrélation propose donc d'évaluer le mérite du nanofluide en faisant le ratio de l'augmentation de la viscosité sur celle de la conductivité thermique. Si le ratio est inférieur à 4 alors nous avons un nanofluide dont les caractéristiques offrent une performance supérieure à celle du fluide de base malgré l'augmentation de la viscosité. Pour illustrer cela, nous avons l'article écrit par Timofeeva et al (2009) : ces derniers ont choisi plusieurs échantillons de nanofluide à base d'Al₂O₃ avec des formes différentes (cylindres, platelets, etc...) ainsi qu'avec des concentrations différentes (1 à 8 %), et ont trouvé dans tous les cas un ratio supérieur à 4. On en déduit pour l'instant que les nanofluides ne sont pas si intéressants dans la mesure où la viscosité augmente trop par rapport au gain sur la conductivité thermique. Par la suite, Timofeeva et al (2010) ont tenté de classer par importance les différents paramètres d'un nanofluide (concentration, forme, taille, etc...) en fonction des différentes propriétés de ce dernier (conductivité thermique, viscosité relative, etc...). On découvre alors que la concentration en nanoparticules est de loin le paramètre le plus important suivi par le choix du fluide de base, puis de la taille des nanoparticules. Afin d'améliorer le ratio entre la viscosité et la conductivité thermique il nous faut prêter attention au choix de la concentration en nanoparticules ainsi que du fluide de base que nous allons utiliser.

Nous avons donc, quand cela était possible, pris les résultats expérimentaux sur l'augmentation de la conductivité thermique et de la viscosité pour chaque article et avons calculé le ratio. Nous avons remarqué que pour Duangthongsuk et Wongwises (2009), Longo et Zilio (2011) et Namburu et al (2008), le ratio est tantôt supérieur et tantôt inférieur à 4. Le

ratio est inférieur à 4 lorsque la température du nanofluide est d'au moins 30°C. Or, dans la gamme de température froide débutant à 10°C, le ratio est bien plus grand que 4. Voici par exemple, les résultats obtenus à partir des valeurs expérimentales de Longo and Zilio (2011) permettent de calculer le nombre de Prasher (Tableau 11) :

C _μ /C _k					
Al ₂ O ₃ (285 nm)	1°C	10°C	20°C	30°C	40°C
0,01	-25,00	-45,00	33,33	11,25	6,67
0,02	32,00	13,64	10,00	7,27	5,36
0,04	22,67	17,00	13,08	8,33	6,09
C _μ /C _k					
Al ₂ O ₃ (165 nm)	1°C	10°C	20°C	30°C	40°C
0,01	-40,00	-36,00	8,00	2,91	2,63
0,02	12,00	5,45	5,00	3,64	3,45
0,04	5,62	4,17	3,33	2,75	2,61
C _μ /C _k					
TiO ₂ (220 nm)	1°C	10°C	20°C	30°C	40°C
0,01	-7,50	-7,50	15,00	7,50	3,75
0,02	-23,33	-35,00	17,50	7,78	7,00
0,04	-100,00	90,00	22,50	15,38	9,52
0,06	-410,00	66,67	28,57	19,52	14,29
C _μ /C _k					
TiO ₂ (155 nm)	1°C	10°C	20°C	30°C	40°C
0,01	-5,00	-5,00	10,00	4,00	2,22
0,02	-20,00	-30,00	15,00	6,00	4,00
0,04	-80,00	60,00	14,00	8,75	5,83
0,06	-300,00	56,00	18,67	12,17	8,75

Tableau 11 : Calcul du nombre de Prasher

Comme on peut le constater, dans la gamme de température présentée ci dessus, le nanofluide n'est pas plus performant que le fluide de base. Les valeurs négatives correspondent au fait que le ratio d'augmentation de la conductivité thermique est inférieur à 1 entraînant une valeur négative pour C_k. Seulement ce calcul est à titre informatif puisque la taille des nanoparticules testées est très importante par rapport aux tailles qu'on a l'habitude de voir. Et sachant que la viscosité augmente avec la taille des nanoparticules, on peut supposer que pour des tailles de l'ordre de la dizaine de nanomètres le ratio de Prasher s'améliore et devient peut être inférieur à 4.

Cependant, le nombre de Prasher n'est admis que pour un régime d'écoulement laminaire. En cas d'écoulement turbulent, le facteur de mérite qui s'applique est le nombre de Mouromtseff (Yu et al., 2009) qui s'écrit comme ceci:

$$Mo = \frac{k^{0,6} \rho^{0,8} Cp^{0,4}}{\mu^{0,4}}$$

Cependant, il n'y a pas dans la littérature étudiée la totalité des paramètres nécessaires à l'évaluation de ce nombre. En effet, il y a peu d'études dans le cas turbulent et lorsque cela est le cas, les auteurs se concentrent sur un seul paramètre en particulier comme la viscosité.

4 Simulation

4.1 Dimensionnement de l'échangeur

4.1.1 Choix du système

4.1.1.1 Type d'échangeur et conditions pré-requises

La première étape de la modélisation numérique consiste à poser le problème que notre simulation va résoudre. Pour cela se pose tout d'abord la question des éléments techniques à choisir.

Nous voulons mesurer la performance et l'intérêt énergétique des nanofluides pour les systèmes frigorifiques, cela nous permet de soulever un premier point important à savoir que la température d'entrée du nanofluide dans l'échangeur sera plus chaude que celle en sortie. Ensuite, comme nous sommes dans le domaine frigorifique, nous allons modéliser notre échangeur comme étant un évaporateur traversé par un tube contenant le nanofluide. Nous avons choisi d'utiliser un évaporateur où le fluide frigorigène serait en changement de phase. Ce dernier serait traversé par un tube de section circulaire dans lequel circule notre nanofluide. L'essentiel pour nous est de voir ce qui se passe dans un système quand on remplace le fluide utilisé par le nanofluide.

La deuxième étape consiste à dimensionner cet échangeur et cela passe par les hypothèses suivantes :

- le fluide froid est à une température arbitraire de -30°C .
- le fluide chaud quant à lui entre à $T_{ce} = -20^{\circ}\text{C}$ et ressort à $T_{cs} = -25^{\circ}\text{C}$. Cette différence de température peut être modifiée ultérieurement mais elle reste représentative de ce qui est obtenu en industrie.
- La puissance thermique que le fluide de base peut transmettre est de 5000 W.
- Grâce aux discussions avec les techniciens et aux recherches effectuées chez les fournisseurs d'échangeurs, nous avons décidé d'opter pour un diamètre interne D_i du tube de 1 cm, qu'il aurait une épaisseur de 1 mm soit un diamètre externe D_e de 1,2 cm et qu'il serait en cuivre.
- On considère que la température de paroi est constante soit $T_p = -30^{\circ}\text{C}$ pour simplifier les calculs.

On peut donc résumer l'ensemble de notre réflexion par la Figure 1:

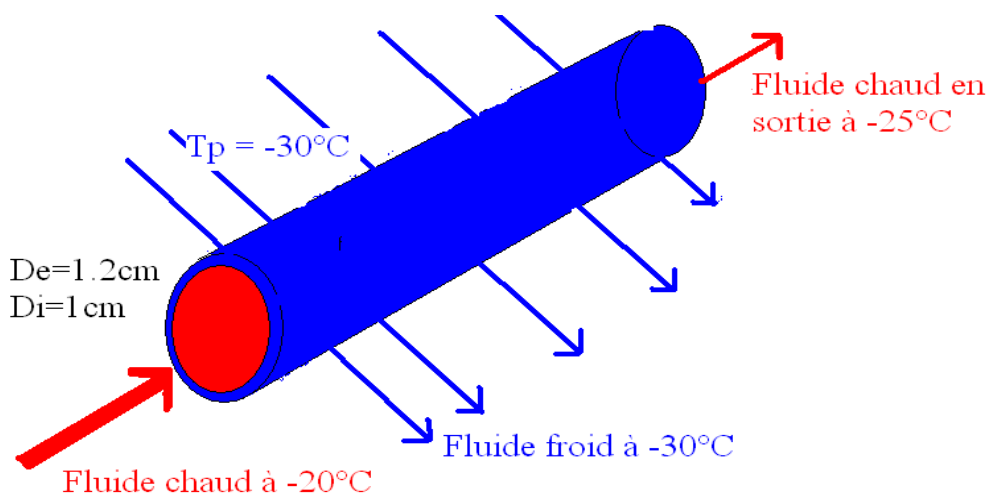


Figure 1 : schéma de l'échangeur modélisé

4.1.1.2 Type de fluide

Il reste à définir deux éléments essentiels pour achever le dimensionnement : la longueur de notre tube et le débit du fluide.

Le calcul des différentes propriétés (la conductivité thermique, la masse volumique, la viscosité et la capacité thermique) suivra le choix du fluide. Grâce à ces propriétés, nous allons déterminer le régime d'écoulement ainsi que le coefficient de transfert thermique et enfin la puissance de pompage. Il est donc nécessaire de lister les différents fluides de base de la littérature et de savoir si ils peuvent répondre à nos attentes dans cette gamme de température :

- Toluène (Zhang et al., 2007) : possédant une température de fusion de -95°C , il semblerait être assez bon. Seulement, dans la littérature, il n'est utilisé qu'avec les nanoparticules d'or (Au).
- Eau (Sahoo et al., 2009) : possédant une température de fusion de 0°C , cela ne correspond pas car nous sommes bien trop bas en température.
- Eau glycolée (Namburu et al., 2007) : tout dépend de la teneur en glycol. Par exemple, avec 30% de glycol, la température de fusion est de $-15,79^{\circ}\text{C}$ (cela est beaucoup trop faible), à 50% nous sommes à une température de fusion de $-37,15^{\circ}\text{C}$. Ceci est déjà beaucoup mieux et, de plus, c'est un fluide de base largement utilisé en industrie ainsi que dans les articles.

Le choix du fluide de base se tourne donc vers l'eau glycolée à 50 %. Avec une telle proportion en glycol, notre viscosité risque d'être très supérieure à celle de l'eau. Nous choisissons ce fluide de base pour notre simulation, seulement il faut encore connaître toutes ses caractéristiques et en particulier : la conductivité thermique, la masse volumique, la viscosité et la capacité thermique.

Nous allons passer à la première phase faisant appel à des calculs. Cela commencera par définir complètement les propriétés de notre fluide de base.

4.1.2 Calculs préliminaires à la méthode NUT

4.1.2.1 Propriétés de l'eau glycolée à 50 %

Comme dit précédemment, nous utilisons de l'eau avec 50 % de glycol comme fluide de base. Seulement, il nous faut pouvoir prédire les valeurs de ses propriétés pour n'importe quelles températures comprises entre -30 et $+10^{\circ}\text{C}$. Pour cela, nous utilisons le logiciel CoolPack qui nous permet de déterminer pour chaque température la valeur des propriétés suivantes :

- k : Conductivité thermique ($\text{W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$)
- μ : Viscosité dynamique (10^{-5} Pa.s)
- ρ : Masse volumique (kg.m^{-3})
- C_p : Capacité calorifique ($\text{kJ.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$)

Grâce à toutes ces données, nous pouvons tracer en fonction de la température les courbes de chacune de ses propriétés (Annexe 2).

Grâce à une régression, nous pouvons créer des corrélations pour toutes les propriétés, ces dernières étant incluses par la suite dans le programme afin d'évaluer rapidement les propriétés.

Conductivité thermique ($W.m^{-1}.K^{-1}$)	$k = -1.000.10^{-6} * Tce^2 + 0.0009 * Tce + 0.3628$
Viscosité dynamique ($10^{-5} Pa.s$)	$mu = -5.795.10^{-7} * Tce^3 + 8.552.10^{-6} * Tce - 3.034.10^{-4} * Tce + 8.142.10^{-3}$
Masse volumique ($kg.m^{-3}$)	$\rho = 1.000.10^{-6} * Tce^3 - 0.0025 * Tce^2 - 0.3384 * Tce + 1081.1$
Capacité calorifique ($kJ.kg^{-1}.K^{-1}$)	$Cp = 7.000.10^{-5} * Tce^3 - 0.0013 * Tce^2 + 3.8825 * Tce + 3203.8$

Tableau 12: Propriétés du fluide de base

Maintenant que le fluide de base est défini, il nous reste à faire le dimensionnement final de l'échangeur, à savoir : calculer la longueur de tube. Mais cela passe par le calcul de différents paramètres tels que la vitesse, le débit massique, et le coefficient de transfert h.

4.1.2.2 Calcul des paramètres

Dorénavant, nous pouvons procéder à l'évaluation de la longueur de notre tube. Nous commençons tout d'abord par définir l'échangeur :

- Diamètre interne, $Di = 0,01$ m
- Diamètre externe $De = 0,012$ m
- Diamètre hydraulique $Dh = Di = 0.01$ m
- Température de l'évaporateur $Tfe = -30^{\circ}C$
- Température d'entrée en échangeur $Tce = -20^{\circ}C$
- Température de sortie d'échangeur $Tcs = -25^{\circ}C$
- Conductivité du tube $k_{CUIVRE} = 390 W.m^{-1}.K^{-1}$

Ensuite, nous calculons les propriétés de notre fluide de base grâce aux corrélations présentées dans le Tableau 12. Ces corrélations seront également reprises dans le calcul de performance des nanofluides.

Paramètres calculés (dans cet ordre)	Formules utilisées
Débit massique ($kg.s^{-1}$)	$\dot{m} = \frac{\dot{Q}}{Cp^*(Tce - Tcs)}$
Débit Volumique ($m^3.s^{-1}$)	$\dot{V} = \frac{\dot{m}}{\rho} \quad (1)$
Vitesse du fluide ($m.s^{-1}$)	$v = \frac{\dot{V}}{\pi * \frac{Dh^2}{4}} \quad (2)$
Nombre de Reynolds	$Re = \frac{\rho^* v^* Dh}{\mu} \quad (3)$
Nombre de Prandtl	$Pr = \frac{\mu^* Cp}{k} \quad (4)$
Coefficient de friction	Laminaire $F_f = \frac{64}{Re_f}$ Turbulent $F_f = 0.790 * \ln(Re - 1.64)^{-2}$
Nombre de Nusselt	Laminaire : $Nu = 3.66 \quad (5)$ Turbulent : $Nu = \frac{\frac{F_f}{8} (Re - 1000) * Pr}{1 + 12.7 * \sqrt{\frac{F_f}{8}} * (Pr^{2/3} - 1)} \quad (6)$
Coefficient de transfert thermique h ($W.m^{-2}.K^{-1}$)	$h = \frac{Nu * k}{Dh} \quad (7)$

Tableau 12: propriétés de l'écoulement du fluide

4.1.2.3 Méthode NUT

La méthode NUT nous permet de calculer la longueur L nécessaire à notre échangeur grâce au KS (coefficient global d'échange thermique). Pour cela, nous avons trois étapes avant d'aboutir à L. Il est noté que dans l'évaporateur on considère que le fluide est en changement de phase donc la capacité calorifique du fluide est infinie. Le calcul de NUT va donc se simplifier:

$$E = \frac{1 - \exp(-NUT(1 - R))}{1 - R * \exp(-NUT(1 - R))} \text{ or } R = \frac{C_{\min}}{C_{\max}} \text{ avec } C_{\max} = +\infty \text{ donc } R = 0$$

$$\text{Ainsi } E = 1 - \exp(-NUT)$$

Paramètres calculés (dans cet ordre)	Formules utilisées
Efficacité de l'échangeur	$E = \frac{T_{ce} - T_{cs}}{T_{ce} - T_{fe}}$
NUT	$NUT = -\log(1 - E)$
KS	$KS = NUT * \dot{m} * C_p$
Longueur de l'échangeur	$L = KS * \left(\frac{1}{2 * \pi * rh * h} + \frac{\log(\frac{re}{rh})}{2 * \pi * k_{CUIVRE}} \right)$

Tableau 13 : application de la méthode NUT

Lors du calcul de la longueur L, nous pouvons négliger $\frac{\log(\frac{re}{rh})}{2 * \pi * k_{CUIVRE}}$ car son ordre de grandeur est de 10^{-7} tandis que $\frac{1}{2 * \pi * rh * h}$ est de l'ordre de 10^{-3} .

L'évaluation de la longueur L nécessaire pour notre échangeur donne une valeur de 176 mètres. Cela semble important mais ceci s'explique par la viscosité de notre fluide ainsi que la puissance thermique désirée.

Au final, notre échangeur est caractérisé et il ne reste plus qu'à refaire les calculs en considérant cette fois constant le débit massique (du moins pour la première partie de la simulation) comme dans différents articles de la bibliographie (Maré et al., 2011). Ce dernier a été évalué à 0.321 kg.s^{-1} et sera repris tel quel pour les calculs de performance aussi bien pour le fluide de base que pour le nanofluide.

4.2 Lancement de la simulation

4.2.1 Performance du fluide de base

Nous énumérons d'abord nos nouvelles conditions initiales:

- Diamètre interne, $D_i = 0,01 \text{ m}$
- Diamètre externe $D_e = 0,012 \text{ m}$
- Diamètre hydraulique $D_h = D_i = 0.01 \text{ m}$
- Température de l'évaporateur $T_{fe} = -30^\circ\text{C}$
- Température d'entrée en échangeur $T_{ce} = -20^\circ\text{C}$
- Longueur de l'échangeur $L = 176 \text{ m}$
- Débit massique $\dot{m} = 0.321 \text{ kg.s}^{-1}$
- Conductivité du tube $k_{CUIVRE} = 390 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$
- La surface d'échange est $S = 2 * \pi * D_h * L$

Ce cas sera appelé le "Cas initial" puisque deux cas de géométrie seront développés par la suite. Le programme va ainsi recalculer les mêmes propriétés que pour le dimensionnement, ainsi que d'autres paramètres tels que la perte de charge ou le PEC. Ainsi la performance du fluide de base s'évalue dans cet ordre :

- Calcul de la capacité calorifique Cp_f , conductivité thermique λ_f , viscosité μ_f , masse volumique ρ_f .
- Calcul du débit volumique $\dot{V}_f$ (1) et de la vitesse du fluide v_f (2).
- Calcul du Reynolds Re_f (3) et Prandtl Pr_f (4).
- Calcul du Nusselt Nu_f (5) ou (6) en fonction du type de régime d'écoulement.
- Calcul du coefficient d'échange h_f (7).

Jusqu'ici nous avons les mêmes calculs que lors du dimensionnement. A partir de là, les calculs sont différents mais restent dans le cadre de la méthode NUT comme le montre le Tableau 14 :

Paramètres calculés (dans cet ordre)	Formules utilisées
Perte de charges (Pa)	$\Delta P = \frac{F_f * L * \rho_f * v_f^2}{2 * Dh}$
KS	$KS_f = \frac{1}{\left(\frac{1}{S_f * h} + \frac{\log\left(\frac{re}{rh}\right)}{2 * \pi * k_{CUIVRE} * L} \right)}$
NUT	$NUT_f = \frac{KS_f}{\dot{m} * Cp_f}$
E	$E = 1 - \exp(-NUT)$
Tcs (K)	$Tcs = Tce - E * (Tce - Tfe)$
Puissance thermique maximale (W)	$\dot{Q}_{MAX} = Cp * \dot{m} * (Tce - Tfe)$
Puissance thermique réelle (W)	$\dot{Q} = E * \dot{Q}_{MAX}$
Puissance de pompage en (W)	$\dot{W} = \Delta P * \dot{V}$
PEC	$PEC = \frac{\dot{Q}}{\dot{W}}$

Tableau 14 : Performance du fluide dans l'écoulement

Les résultats obtenus constitueront un élément de comparaison une fois les calculs effectués pour les nanofluides. Rappelons que ce qui nous intéresse en particulier est d'avoir un PEC pour le nanofluide supérieur à celui du fluide de base.

4.2.2 Apport de Nanoparticules

4.2.2.1 Listes des nanoparticules

Une fois les calculs de performance du fluide de base effectués, il est temps de passer aux calculs des performances du nanofluide. Mais avant cela, il nous faut faire un point sur les nanoparticules qui vont être utilisées. Nous utiliserons tout d'abord les nanoparticules utilisées dans la littérature, à celles-ci s'ajoutent d'autres nanoparticules dont le produit de la capacité calorifique et de la masse volumique ($\rho * Cp$) donne un résultat important (particulièrement en laminaire). Pour sélectionner nos nanoparticules, nous avons besoin de trois paramètres clés :

- Conductivité thermique
- Capacité calorifique
- Masse volumique

Nous allons donc chercher des nanoparticules où ces trois paramètres sont élevés. C'est ainsi que nous aboutissons à une liste de douze nanoparticules (Annexe 4) :

*Initial : Al_2O_3 , SiO_2 , TiO_2 , Au, SiC, CuO, Cu (utilisés dans la littérature (Maré et al., 2011)).

*Nouvelles nanoparticules : Co, Ir, Fe, Ni, Pt (sélectionnées pour leur grande masse volumique) et Al_2O_3 , Cu (parmi les plus utilisées dans la littérature).

Les nanoparticules étant sélectionnées, la suite consistera à réévaluer la capacité calorifique, la conductivité thermique, la viscosité dynamique et la masse volumique de notre nanofluide en fonction de la concentration volumique en nanoparticules.

4.2.2.2 Corrélations pour réévaluer les propriétés

Nous avons remarqué dans la littérature (Kulkarni et al., 2009) qu'il existe beaucoup de corrélations pour évaluer la conductivité thermique et la viscosité du nanofluide. Il est nécessaire de choisir une corrélation unique qui sera utilisée pour les calculs. Le Tableau 15 liste les corrélations utilisées:

Propriétés réévaluées	Corrélations
Conductivité thermique (éq. de Maxwell)	$k_{nf} = k_f \left[\frac{(k_s + 2k_f + 2(k_s - k_f)\phi)}{k_s + 2k_f - 2(k_s - k_f)\phi} \right]$
Viscosité dynamique (éq. de Thomas)	$\mu_{nf} = \mu * (1 + 2.5 * \phi + 10.05 * \phi^2 + 0.00273 * \exp(16,6 * \phi))$
Capacité calorifique	$Cp_{nf} = \frac{(1 - \phi) * Cp_f * \rho_f + Cp_s * \rho_s * \phi}{\rho_{nf}}$
Masse volumique	$\rho_{nf} = (1 - \phi) * \rho_f + \phi * \rho_s$

Tableau 15: Réévaluations des propriétés du nanofluide

On remarque que la formule de la viscosité n'accorde d'importance qu'à la concentration volumique en nanoparticules. Or, nous avons pu voir dans les études bibliographiques (Aladag et al., 2012) qu'en fonction de la taille et de la nature de la nanoparticule utilisée, nous avons des résultats différents quant à l'augmentation de viscosité. Ici, notre viscosité sera la même quel que soit le type de nanoparticules.

Notre programme va suivre les mêmes étapes que pour le fluide de base, et une fois tous les calculs effectués nous allons comparer les PEC:

$$Ratio_PEC = \frac{PEC_{nf}}{PEC_f}$$

Nous avons trois cas de figures:

- ratio_PEC < 1 : le nanofluide est moins performant que le fluide de base.
- ratio_PEC = 1 : le nanofluide est aussi performant que le fluide de base.
- ratio_PEC > 1 : le nanofluide est plus performant que le fluide de base.

Avant de passer à la phase « exploitation des résultats », il faut préciser que la simulation à commencer en considérant l'hypothèse que le débit massique est constant. A ce moment là, nous n'avons que sept nanoparticules (Al_2O_3 , SiO_2 , TiO_2 , Au, SiC, CuO, Cu). Cependant, en voyant que la masse volumique influait en positif sur le ratio_PEC, nous avons décidé de prendre de nouvelles nanoparticules en plus : Co, Ir, Fe, Ni, Pt (sélectionnées pour leur grande masse volumique) et Al_2O_3 , Cu (parmi les plus utilisées dans la littérature).

4.2.3 Performance du nanofluide pour un débit massique constant

4.2.3.1 Laminaire

Une fois tous les calculs effectués par le programme, nous exportons les résultats sur un fichier séparé afin de tracer des courbes de comparaison entre les différentes nanoparticules. Nous obtenons ainsi des courbes qui nous permettent de prédire le comportement des nanofluides.

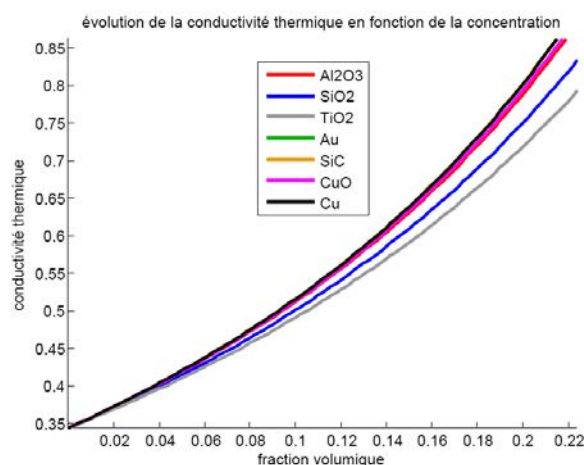


Figure 2 : évolution de la conductivité thermique

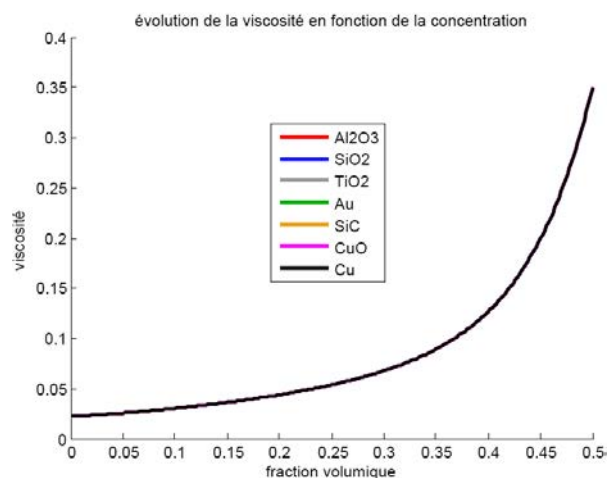


Figure 3: évolution de la viscosité

La conductivité thermique et la viscosité augmentent en fonction de la concentration volumique, comme le stipulaient les articles de la littérature (Kulkarni et al., 2009). En revanche, on remarque que la viscosité est la même pour chaque nanoparticule et quelle n'augmente pas autant que ce qui a été observé dans la littérature (Maré et al., 2011).

En voyant ces augmentations, il nous faut maintenant vérifier l'augmentation du coefficient d'échange et plus important, vérifier que le ratio_PEC est supérieur à 1.

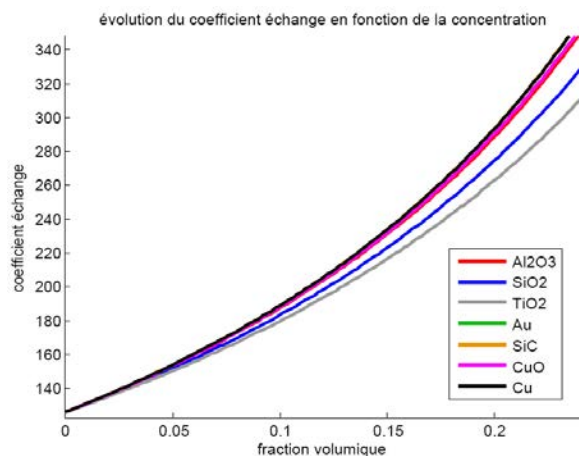


Figure 4: coefficient d'échange thermique

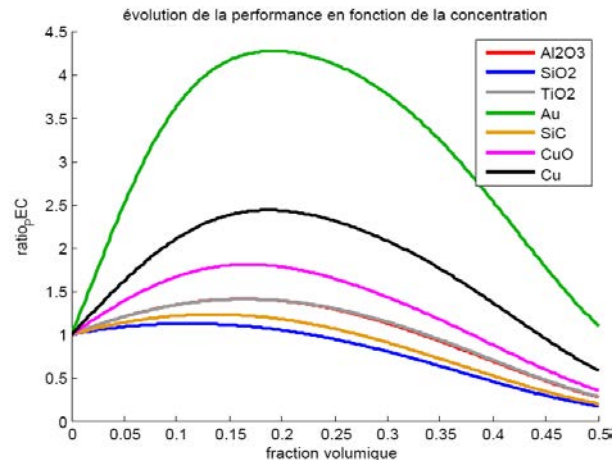


Figure 5: ratio_PEC à débit massique constant

Le coefficient d'échange thermique augmente également (Figure 4) : cela est justifié vu qu'il dépend essentiellement de la conductivité thermique du nanofluide. En revanche, le ratio_PEC est supérieur à 1, atteint un pic avec 20 % de concentration volumique puis diminue, parfois en dessous de 1.

La conclusion est que le nanofluide est plus performant que le fluide de base. Ceci dit le pic est atteint vers 20% en concentration volumique. Or, dans la réalité, nous n'irons pas plus loin de 6 %. Nous allons jusqu'à 50 % pour voir le comportement du nanofluide sur une plus grande plage de concentration.

Il nous faut comprendre pourquoi le ratio_PEC augmente puis diminue. Pour cela il est nécessaire d'étudier les courbes de la puissance thermique et de la puissance de pompage.

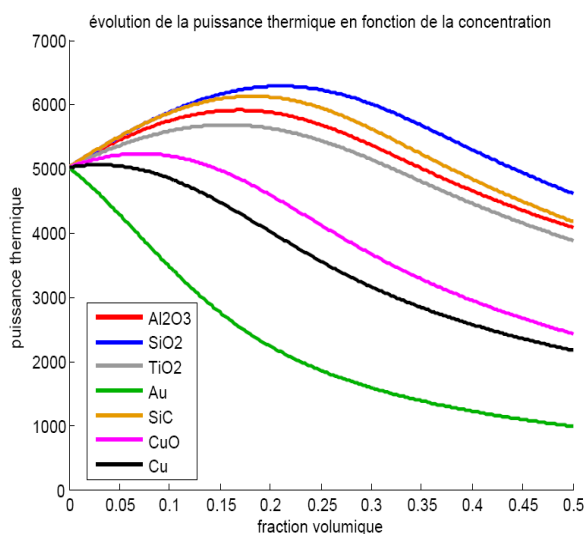


Figure 6: puissance thermique en laminaire

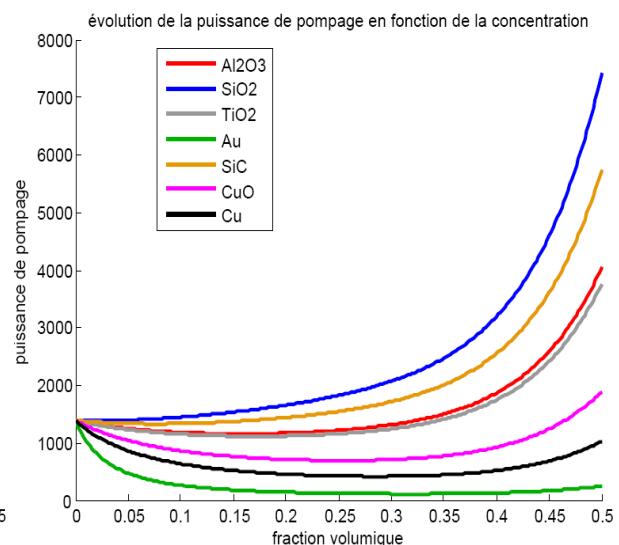


Figure 7 : puissance de pompage en laminaire

On voit que l'or possède le meilleur ratio_PEC : d'après les résultats, il est le meilleur nanofluide testé. En y regardant de plus près, on voit que la puissance de pompage et la puissance thermique diminuent. Commentons donc ces deux courbes pour éclaircir les résultats obtenus sur le ratio_PEC.

*Puissance thermique (rappelons la formule $\dot{Q} = C_p * \dot{m} * (T_{ce} - T_{cs})$) :

Dans cette formule, notre différence de température est la même tout le temps (du moins dans le cas présent). D'après le dimensionnement fait précédemment, le débit massique est constant, seule la capacité calorifique du nanofluide intervient. Or, d'après la Figure 8, le nanofluide à base d'or est celui qui possède la plus faible capacité calorifique. Donc les nanoparticules les plus intéressantes dans notre cas sont celles possédant une faible capacité calorifique si on se réfère à la puissance thermique pour choisir.

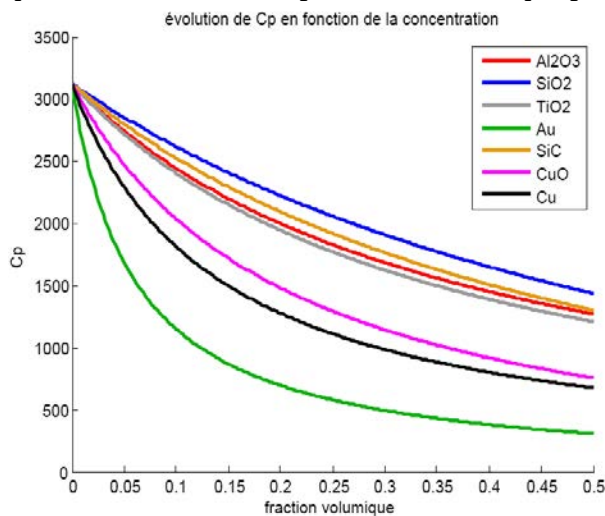


Figure 8 : capacité calorifique du nanofluide

*Puissance de pompage (rappelons la formule $\dot{W} = \Delta P * \dot{V}$) :

Dans notre cas, il est assez difficile de donner une représentation physique de cette puissance. En effet, les pertes de charges augmentent et le débit volumique diminue lorsque la concentration volumique augmente. On pourra juste souligner que ces deux facteurs dépendent de la masse volumique du nanofluide puisqu'il est prépondérant dans leurs calculs.

En conclusion, nous voyons que le ratio_PEC dépend essentiellement de la capacité calorifique de notre nanofluide. Ceci n'est qu'une première conclusion et elle est un peu biaisée puisque nous ne pouvons pas réellement exploiter la puissance de pompage en terme de sensibilité des termes permettant son calcul. Aussi il est essentiel de passer aux calculs en régime turbulent afin de valider notre hypothèse de départ à savoir débit massique constant.

4.2.3.2 Turbulent

En conservant nos hypothèses de départ sur le dimensionnement de l'échangeur, nous avons remarqué que le nombre de Reynolds n'atteignait pas le régime turbulent. Il a donc fallu redimensionner l'échangeur et différencier le modèle en laminaire et en turbulent. Ainsi le dimensionnement de l'échangeur en régime turbulent devient le suivant :

- Diamètre interne, $D_i = 0,0038$ m au lieu de 0.01m
- Diamètre externe $D_e = 0.0048$ m au lieu de 0.012m

- Diamètre hydraulique $D_h = D_i = 0.0038$ m au lieu de 0.01m
- Température de l'évaporateur $T_{fe} = -30^\circ\text{C}$
- Température d'entrée en échangeur $T_{ce} = -20^\circ\text{C}$
- Température de sortie d'échangeur $T_{cs} = -28^\circ\text{C}$ au lieu de -25°C .
- Conductivité du tube $k_{\text{CUIVRE}} = 390 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$
- La longueur $L = 13.40$ m
- Débit massique $\dot{m} = 0.200 \text{ kg.s}^{-1}$

Avec ce nouveau dimensionnement, nous pouvons observer le comportement des nanofluides en régime turbulent ($Re = 3000$ pour le fluide de base). Aussi, le nombre de Reynolds diminue avec l'augmentation de la concentration volumique des nanoparticules. Cette diminution vient du fait que la viscosité prend le dessus sur la masse volumique. Nous faisons les calculs jusqu'à maximum 6% sinon nous retombons en laminaire.

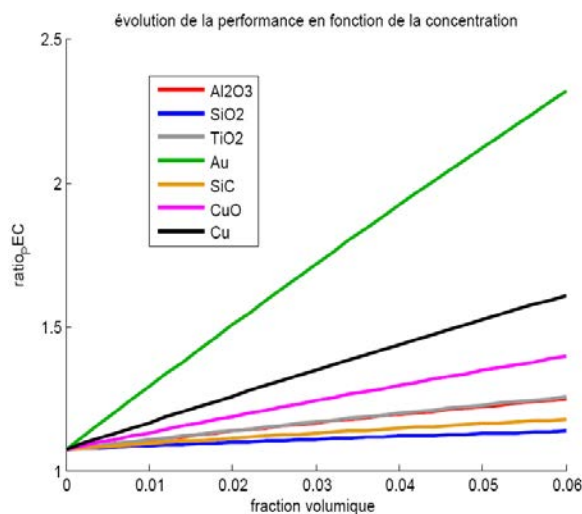


Figure 9 : ratio_PEC en turbulent

On remarque que le ratio_PEC est également supérieur à 1 dans la simulation pour toutes les nanoparticules utilisées, et pour mieux comprendre le phénomène nous reprenons les graphes pour la puissance thermique et la puissance de pompage.

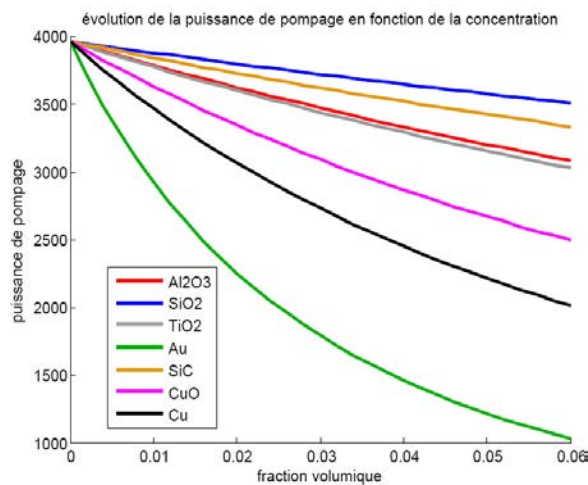


Figure 10 : puissance de pompage en turbulent

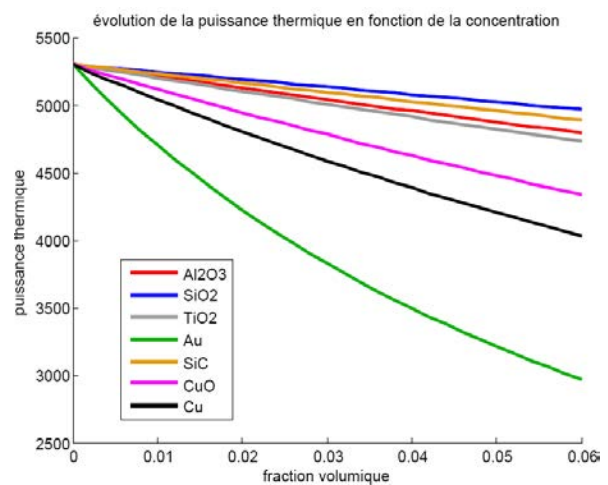


Figure 11 : puissance thermique en turbulent

La puissance de pompage et la puissance thermique diminuent toutes les deux et ce pour toutes les nanoparticules répertoriées. On peut constater que les résultats précédents sont en effet biaisés pour deux raisons:

- On ne devrait tenir compte que de la conductivité thermique pour déterminer la meilleure nanoparticule vu qu'il s'agit d'un des principaux paramètres qui influencent le coefficient de transfert et donc la puissance thermique. De ce fait on devrait avoir SiC prédominant.
- Nous ne connaissons pas la courbe de fonctionnement de la pompe comme le montre en exemple la Figure 12 : courbe de performance d'une pompe. En effet si nous sommes dans la partie gauche de la courbe, la pression motrice aura une faible influence sur la pompe et à l'inverse il aura une forte influence dans la partie supérieure de la courbe. Nous savons que la courbe de fonctionnement du nanofluide se situe au dessus de celle du fluide de base si la viscosité est supérieure, mais le problème est de savoir où exactement.

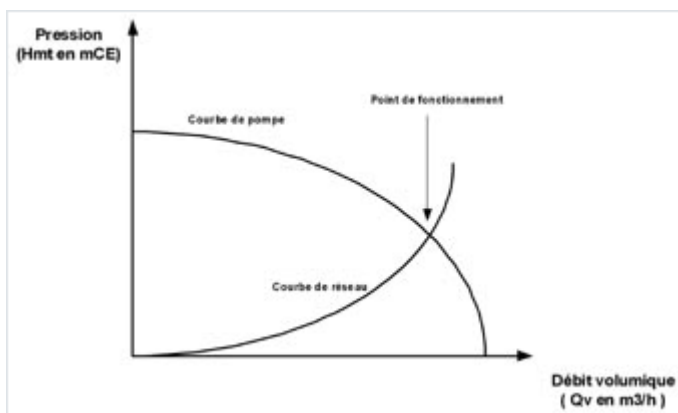


Figure 12 : courbe de performance d'une pompe

De plus, le but final de ces recherches sur les nanofluides est de permettre à une industrie de pouvoir utiliser au mieux les nanofluides sans devoir changer ses installations. Ainsi il sera judicieux de travailler avec une puissance de pompage constante. Cela nous permet aussi de pouvoir mieux interpréter les résultats sur le ratio_PEC vu que seul le numérateur (puissance thermique) varie avec la concentration volumique.

4.3 Simulation pour une puissance de pompage constante

4.3.1 Réévaluation des performances

4.3.1.1 Calcul du débit volumique

En considérant la puissance de pompage constante dans notre échangeur, il y a une phase de réécriture du programme afin de calculer en premier lieu le débit volumique en régime laminaire et en turbulent. En d'autres termes, cette fois le débit massique n'est plus considéré comme constant d'où un changement à effectuer sur les équations.

*Laminaire :

$$\begin{aligned}
\dot{W} &= \Delta P * \dot{V} \\
&= \frac{F_f * L * \rho_f * v_f^2}{2 * Dh} * \dot{V} \\
&= \frac{64 * L * \rho_f * v^2}{2 * Re * Dh} * \dot{V} \\
&= \frac{64 * L * \rho_f}{2 * Dh} * \left(\frac{\mu}{\rho * v * Dh} \right) * \left(\frac{16 * \dot{V}}{\pi^2 * Dh^4} \right) \\
&= 128 * L * \mu * \frac{1}{\pi * Dh^4} * \dot{V}^2 \\
\dot{V} &= \sqrt{\frac{\dot{W} * \pi * Dh^4}{128 * L * \mu}}
\end{aligned}$$

*Turbulent :

Sans rentrer dans les détails de programmation, nous évaluons tout d'abord la puissance de pompage :

$$\begin{aligned}
\dot{W} &= \dot{W} = \Delta P * \dot{V} \\
&= \frac{F_f * L * \rho_f * v_f^2}{2 * Dh} * \dot{V} \\
&= 0,316 * Re^{-1/4} * \frac{L * \rho * v^2}{2 * Dh} * \dot{V} \\
&= 0,316 * \left(\frac{\rho * Dh * 4 * \dot{V}}{\mu * \pi * Dh^2} \right) * \frac{L * \rho * 8 * \dot{V}^3}{Dh^5 * \pi^2} \\
&= 0,316 * \left(\frac{4 * \rho *}{\mu * Dh * \pi} \right)^{-1/4} * L * \rho * \frac{8}{Dh * \pi^2} * \dot{V}^{2,75}
\end{aligned}$$

A partir de cette formule, nous calculons le nouveau débit volumique en régime turbulent.

Nous pouvons désormais relancer les calculs en ayant une puissance de pompage constante. Cette fois-ci le débit massique va varier suivant la nanoparticule utilisée, ainsi que sa concentration.

4.3.1.2 Laminaire

Nous reprenons en régime laminaire la même configuration pour l'échangeur que précédemment, la différence est qu'au lieu de prendre un débit massique constant, on va le prendre non constant. Les étapes et les calculs restent les mêmes pour le fluide de base, et à partir de la puissance de pompage trouvée pour le fluide de base, nous pouvons calculer le débit volumique du nanofluide, puis son débit massique.

La suite des calculs pour le nanofluide restent ensuite les mêmes que précédemment.

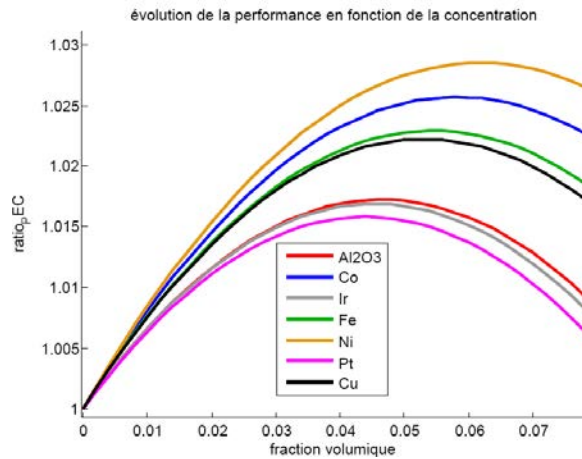


Figure 13 :ratio_PEC groupe new

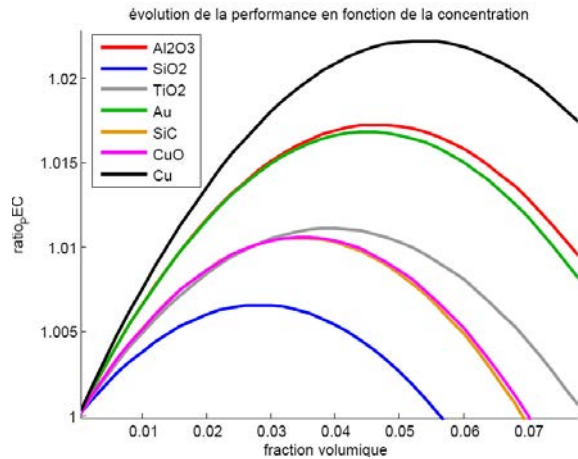


Figure 14: ratio_PEC groupe "initial"

Comme on peut le constater, pour les Figure 13 et Figure 14, les PEC des nanofluides sont supérieurs à celui de l'eau glycolée. Aussi, pour comprendre ce phénomène, nous analysons la puissance thermique.

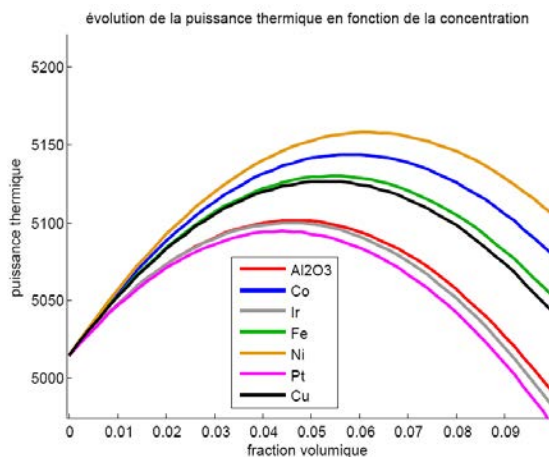


Figure 15 : puissance thermique groupe "new"

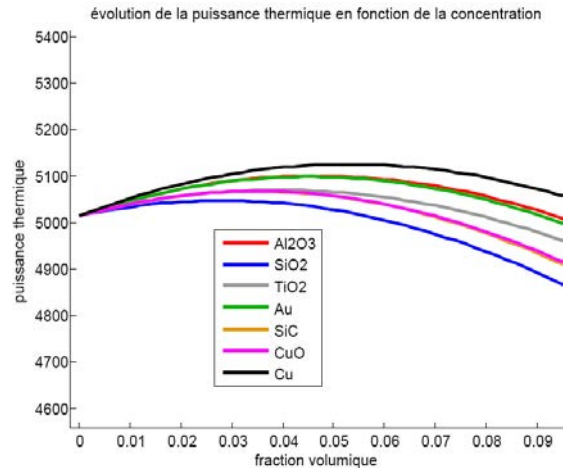


Figure 16: puissance thermique groupe "premier"

La puissance thermique augmente puis diminue pour certains (Ni, Pt, Cu) tandis que pour d'autres l'augmentation est faible comme SiO₂. Pour expliquer cela reprenons la formule de la puissance thermique: $\dot{Q} = C_p * \dot{m} * (T_{ce} - T_{cs})$. Il nous faut donc étudier la courbe de $C_p * \dot{m}$ pour comprendre l'évolution de la puissance thermique.

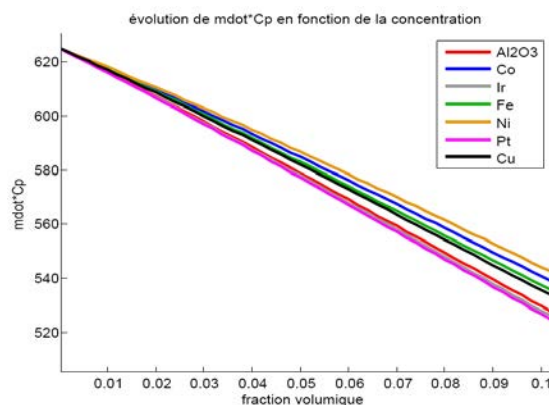


Figure 17 : mdot*Cp groupe "new"

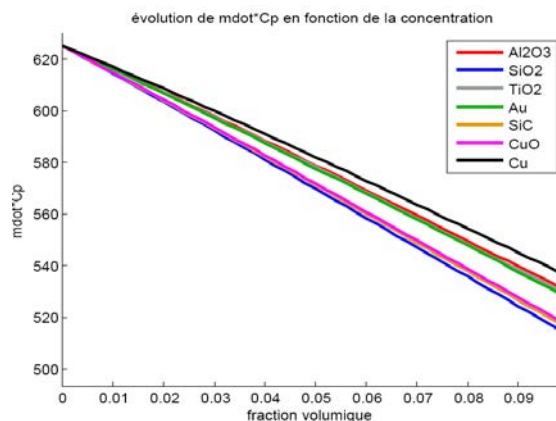


Figure 18 : mdot*Cp groupe "premier"

D'un premier constat, plus $Cp \cdot \dot{m}$ est grand plus le ratio_PEC est grand. Une première conclusion est donc que la performance du nanofluide provient de la valeur de $Cp \cdot \dot{m}$. Mais il serait judicieux de chercher si d'autres paramètres ont des effets importants. En effet :

$$Cp \cdot \dot{m} = \dot{V} \cdot \rho \cdot Cp$$

Or nous l'avons montré juste avant $\dot{V} = \sqrt{\frac{\dot{W} \cdot \pi \cdot Dh^4}{128 \cdot L \cdot \mu}}$ en laminaire. Ceci est très important puisqu'on remarque que seule la viscosité entre en considération dans l'évolution de $\dot{V}$, or la viscosité ne dépend pas du type de nanoparticule utilisée. Aussi seul $\rho \cdot Cp$ permet de discriminer les nanoparticules comme le montre les Figure 19 et Figure 20.

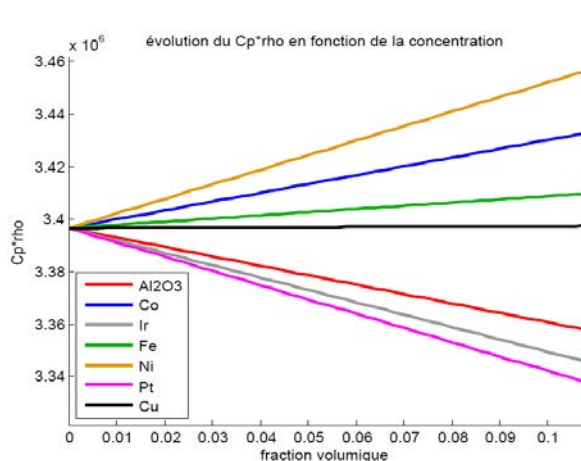


Figure 19: $\rho \cdot Cp$ groupe "new"

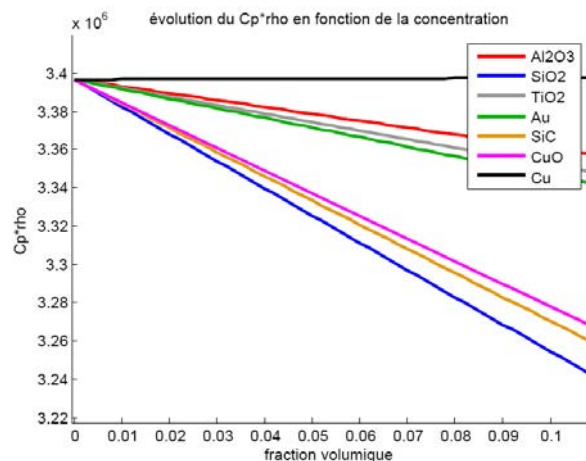


Figure 20: $\rho \cdot Cp$ groupe "premier"

Ainsi, on constate que ce sont les nanoparticules ayant le plus grand $\rho \cdot Cp$ qui ont un meilleur ratio_PEC.

4.3.1.3 Turbulent

Nous passons maintenant à la simulation en régime turbulent afin de voir comment se comportent les nanofluides et aussi voir si il y a une similitude avec le régime laminaire. Le mode opératoire est le même que pour le régime laminaire sauf que nous avons un Dh plus faible (0.0038m) ainsi qu'un gradient de température entrée/sortie de l'échangeur de 8 degrés.

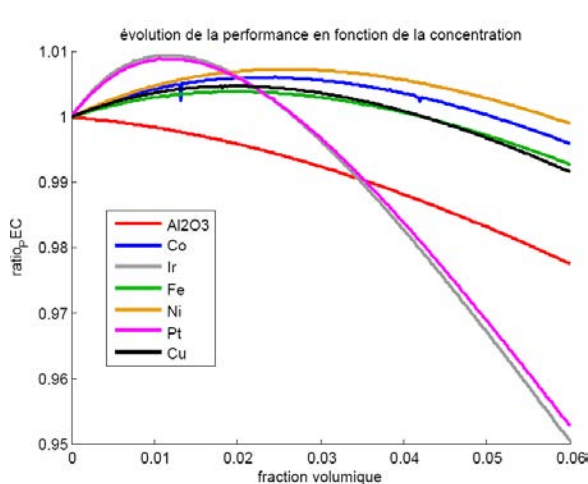


Figure 21 : ratio_PEC groupe "new"

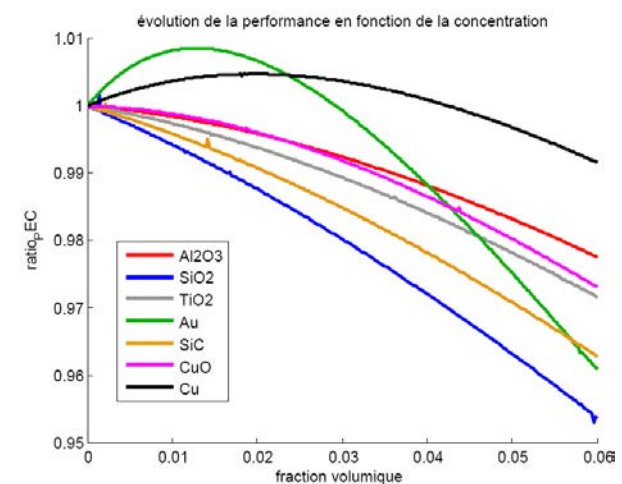


Figure 22: ratio_PEC groupe "premier"

Cette fois le ratio_PEC est beaucoup moins important surtout pour certaines nanoparticules telles que SiO_2 , TiO_2 , Al_2O_3 . Essayons donc d'expliciter cette évolution du ratio_PEC.

Observons l'évolution de la puissance thermique, $C_p \cdot \dot{m}$, $\rho \cdot C_p$ comme en laminaire.

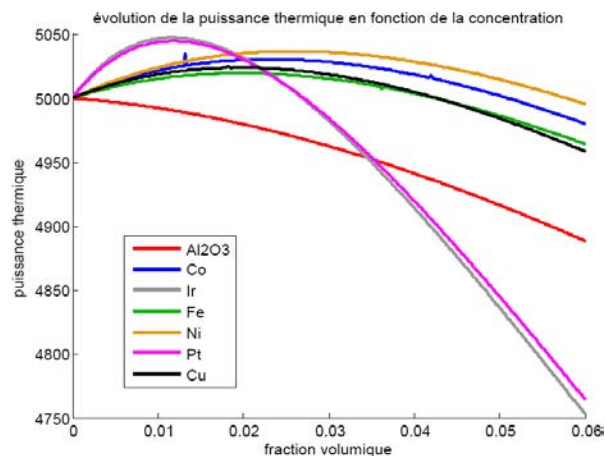


Figure 23 : puissance thermique groupe "new"

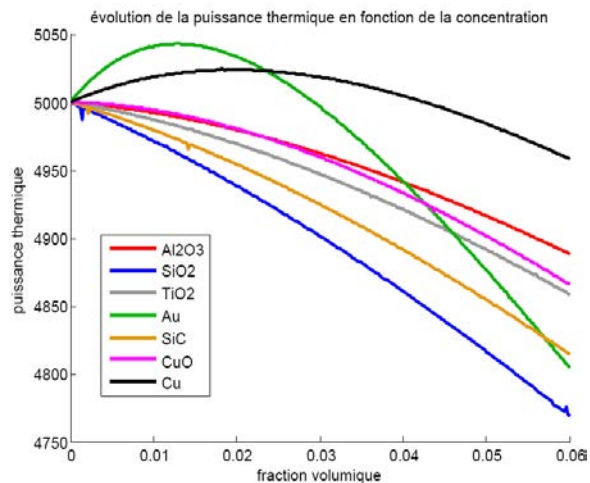


Figure 24: puissance thermique groupe "premier"

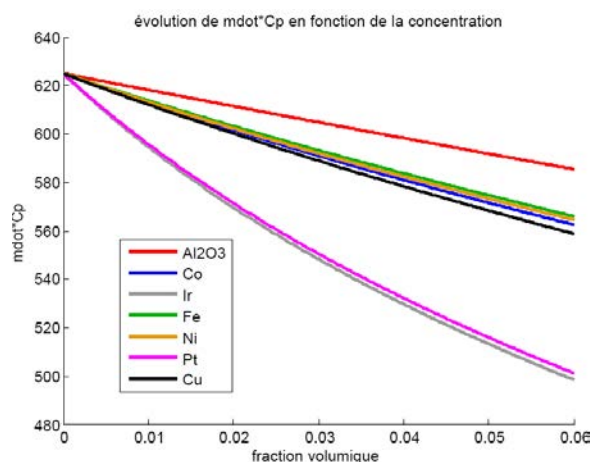


Figure 25: mdot*Cp groupe "new"

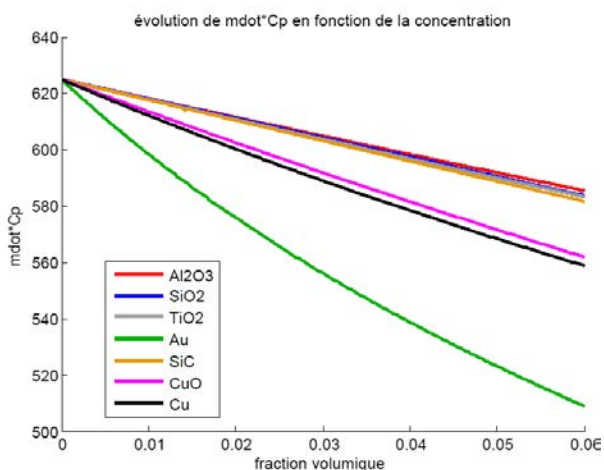


Figure 26: mdot*Cp groupe "premier"

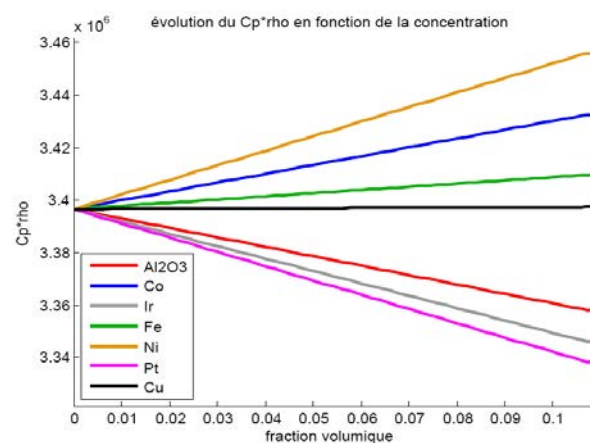


Figure 31: rho*Cp groupe "new"

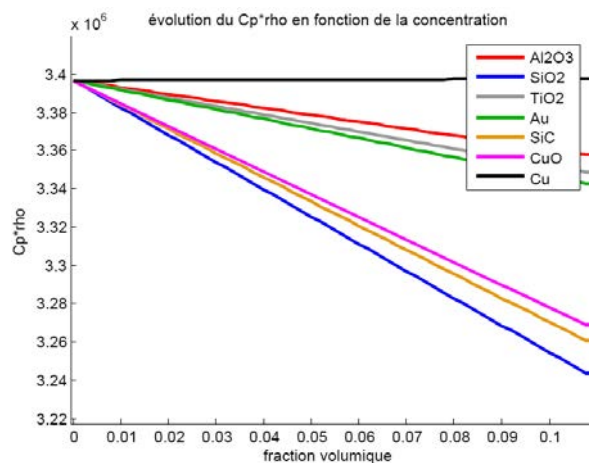


Figure 32: rho*Cp groupe "premier"

Il est assez difficile de pouvoir donner une explication de l'évolution du ratio_PEC sans y ajouter les courbes du C_p et de ρ . Mais à première vue, l'évolution du ratio_PEC dépend également de $\dot{m} * C_p$ vu qu'il s'agit du seul terme qui évolue dans la formulation de la puissance thermique. En revanche $\dot{m} * C_p$ ne permet pas de conclure sur l'explication de l'évolution du ratio_PEC, mais $\dot{m} * C_p$ dépend lui-même de $\rho * C_p$. $\rho * C_p$ ne permet pas non plus de conclure, il faut donc observer de plus près les courbes de C_p et ρ et faire une analyse de sensibilité.

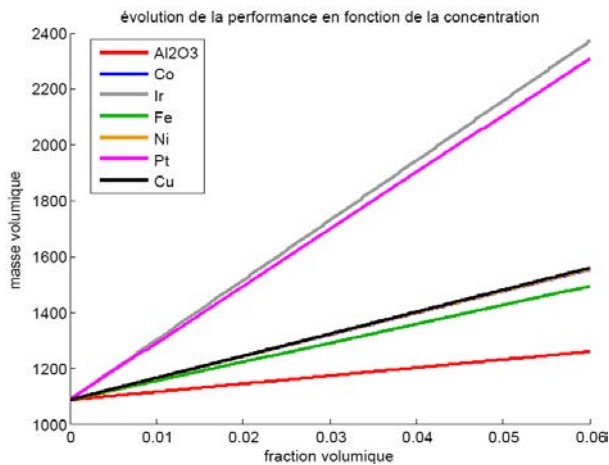


Figure 27: masse volumique groupe "new"

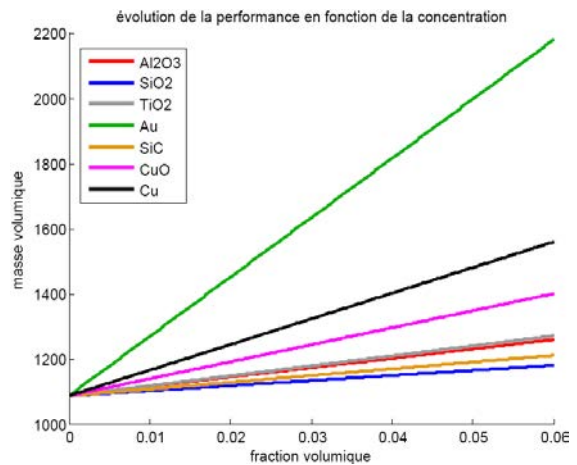


Figure 28: masse volumique groupe "premier"

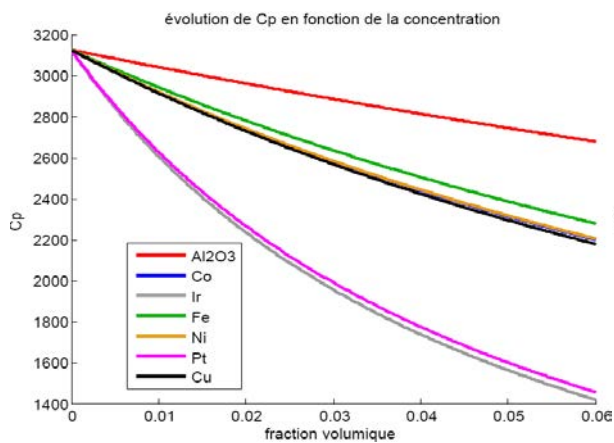


Figure 29: Cp groupe "new"

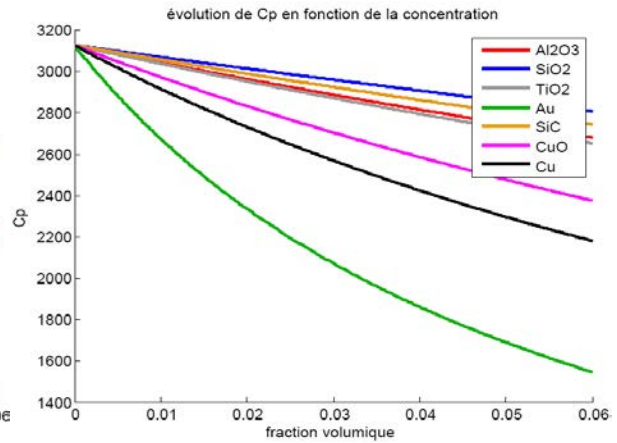


Figure 30: Cp groupe "premier"

Afin d'expliquer l'augmentation et la diminution du ratio_PEC, procédons à une analyse dimensionnelle (en se basant seulement sur les termes qui sont influencés par le type de nanoparticules):

$$\dot{m} * C_p = C_p * \dot{V} * \rho$$

Or:

$$\dot{V}^{2.75} = \rho^{1/4-1}$$

$$\dot{V} = \rho^{(1/4-1)*4/11} = \rho^{-12/44} = \rho^{-0.27} \quad \text{car dans la formule éditée en régime turbulent}$$

$\dot{W} = 0,316 * \left(\frac{4 * \rho *}{\mu * Dh * \pi} \right)^{-1/4} * L * \rho * \frac{8}{Dh * \pi^2} * \dot{V}^{2.75}$ seule la masse volumique est influencée par le type de nanoparticules.

$$Cp * \rho * \rho^{-12/44} = Cp * \rho^{32/44} = Cp * \rho^{0.72}$$

La masse volumique a beaucoup moins d'importance que le Cp, et ceci explique que trois courbes (Au, Ir, Pt) des Figure 21 et Figure 22 augmentent puis chutent dès que la concentration volumique dépasse 1,5%. En effet, ces trois nanoparticules possèdent de faibles capacités calorifiques et une masse volumique très importante. Ainsi, au début la masse volumique est prédominante mais ensuite la capacité calorifique prend le relais. Si ce phénomène n'est pas observé pour les autres nanoparticules c'est le fait que l'évolution de leurs capacités calorifiques et masses volumiques est bien plus faible que pour les trois nanoparticules citées.

4.3.2 Changement du système

Dans la suite de l'analyse des résultats numériques, nous ne nous concentrerons que sur le groupe "new" pour une question de simplicité.

4.3.2.1 Cas 2 : "DeltaT = 20" entre évaporateur et entrée nanofluide

Nous avons pu constater également que l'efficacité de notre échangeur était élevée même avec le fluide de base:

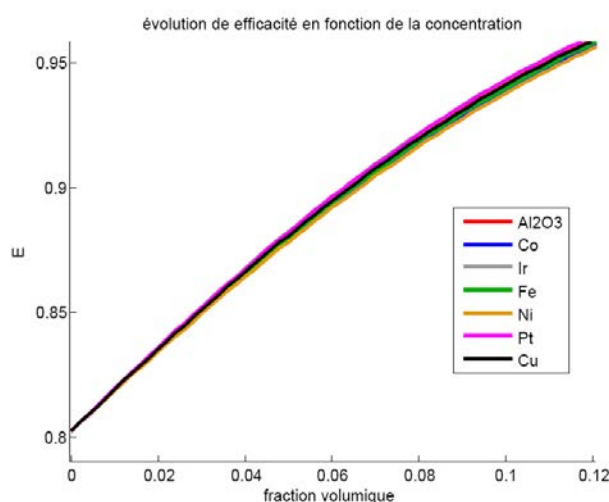


Figure 31: Efficacité en laminaire

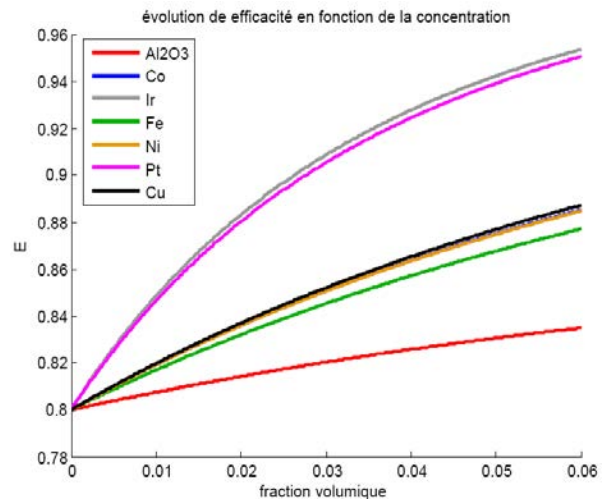


Figure 32: efficacité en turbulent

On a :

$$E = \frac{T_{ce} - T_{cs}}{T_{ce} - T_{fe}} = 0.80$$

Cela est donc moyennement intéressant vu que nous voulons améliorer de manière considérable l'efficacité. Aussi dans le précédent cas, l'efficacité n'augmente que de 15%.

Aussi, on change de configuration le système, et nous modifions la température de l'évaporateur : elle passe de -30°C à -40°C . De ce fait notre efficacité est divisée par deux (0.40). Dès lors nous relançons les calculs et observons de nouvelles courbes.

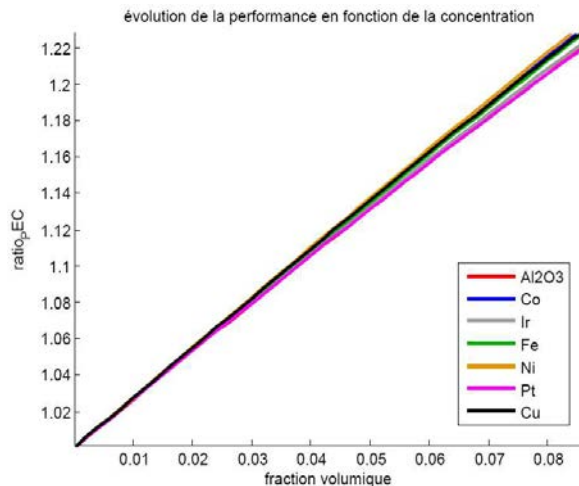


Figure 33: ratio_PEC en laminaire

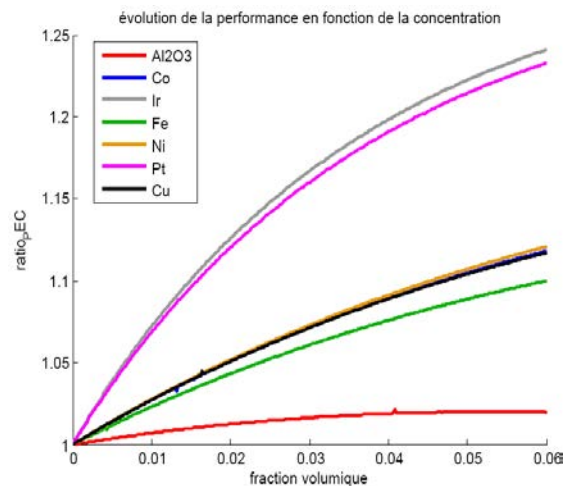


Figure 34: ratio_PEC turbulent

On constate que toutes les courbes ratio_PEC sont supérieures à celles de la configuration précédente, nous avons donc amélioré grandement la performance des nanofluides.

Il faut vérifier par la suite que le ratio_PEC dépend bien encore de $\rho * Cp$ comme l'a montré l'étude du cas précédent.

Tout d'abord, en laminaire le ratio_PEC dépend bien de $\rho * Cp$ vu que plus le couple est grand plus le ratio_PEC est grand, cela concorde toujours avec l'analyse du précédent cas.

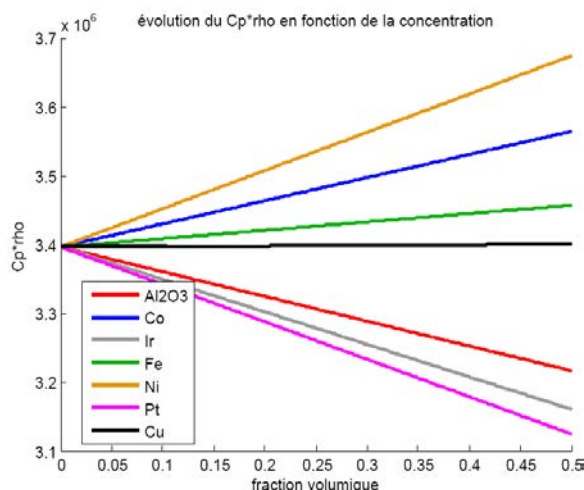


Figure 35 : $Cp \cdot \rho$ du groupe "new"

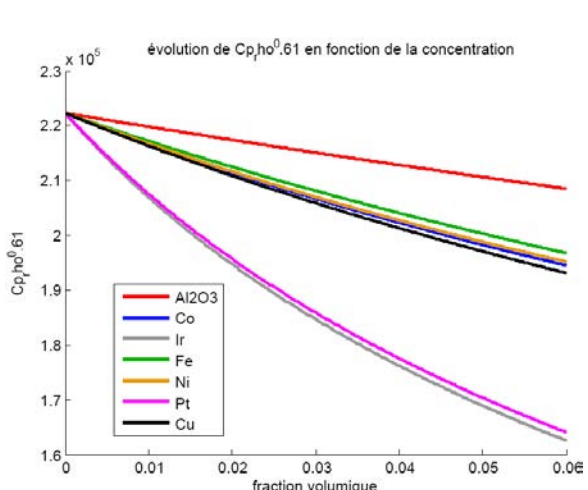


Figure 36: $Cp \cdot \rho^{0.61}$ du groupe "new"

En revanche il n'y a pas concordance entre $Cp * \rho^{0.61}$ et le ratio_PEC comme le sous entendait le premier cas en turbulence. En effet on remarque que l'ordre croissant des courbes entre Fe, Ni, Co et Cu ne concorde pas à l'ordre croissant des courbes pour ces mêmes nanoparticules de la Figure 33 (Fe devrait être suivi par Co et non Ni).

Cela signifie donc qu'il y a une hypothèse simplificatrice par rapport à la démonstration faite auparavant. Pour cela, ajoutons l'efficacité dans l'analyse dimensionnelle.

Notons que les paramètres pris en considérations sont : la capacité calorifique, la masse volumique et également la conductivité thermique même si la différence entre nanoparticules est faible.

D'abord, on évalue la sensibilité du nombre de Reynolds et du nombre de Prandtl:

$$Re = \rho * \dot{V} = \rho * \rho^{-12/44} = \rho^{32/44}$$

$$Pr = \frac{Cp}{k} = Cp * k^{-1}$$

Puis, évalue la sensibilité du nombre de Nusselt suivi de h :

$$Nu = \rho^{32/44} * Cp * k^{-1} * Cp^{-2/3} * k^{2/3}$$

$$h = Nu * k = \rho^{32/44} * Cp * k^{-1} * Cp^{-2/3} * k^{2/3} * k$$

$$= \rho^{32/44} * Cp^{1/3} * k^{2/3}$$

Or, le NUT se calcul grâce à h, donc on évalue sa sensibilité:

$$NUT = \frac{h * S}{\rho * \dot{V} * Cp} = Cp^{-2/3} * k^{2/3}$$

Nous pouvons au final évaluer la sensibilité de la puissance thermique :

$$\dot{Q} = \dot{m} * Cp * \Delta T * E$$

$$= \rho^{12/44} * Cp * Cp^{-2/3} * k^{2/3}$$

$$= \rho^{12/44} * Cp^{1/3} * k^{2/3}$$

Notre nouvelle analyse suggère que le ratio_PEC soit défini par le résultat de $\rho^{12/44} * Cp^{1/3} * k^{2/3}$ pour chaque nanoparticule.

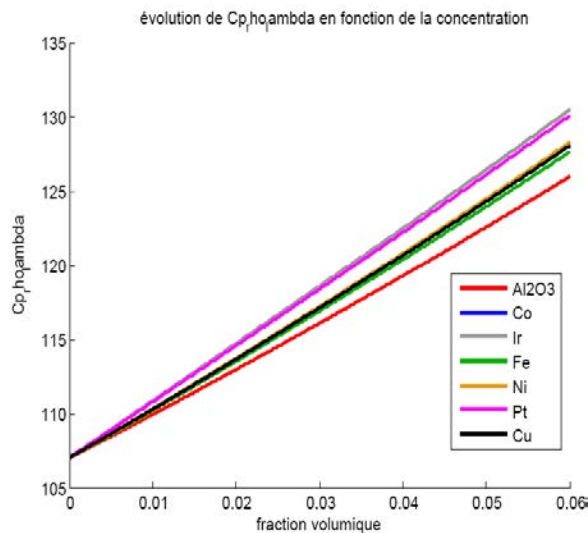


Figure 37: $\rho^{(0.27)} * Cp^{(0.33)} * k^{(0.66)}$

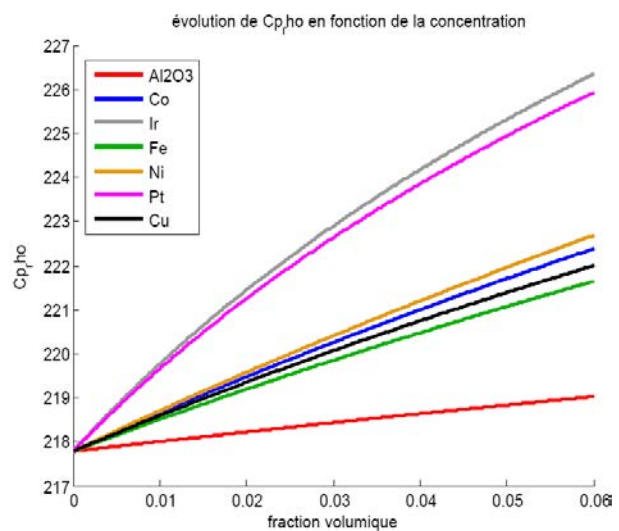


Figure 38: $\rho^{(0.27)} * Cp^{(0.33)}$

Le tracé de $\rho^{12/44} * Cp^{1/3} * k^{2/3}$ qui est représenté par la Figure 37 montre bien cette fois-ci que le ratio_PEC dépend de ces trois facteurs avec les coefficients appropriés. En revanche pour plus de clarté et pour être sûr qu'on peut négliger la conductivité thermique, nous avons la Figure 38 qui représente l'évolution de $\rho^{12/44} * Cp^{1/3}$ ainsi que la Figure 39 qui confortent cette hypothèse puisque la différence entre nanoparticules sur l'évolution de la conductivité est très faible. Donc, on peut faire une nouvelle hypothèse ; l'augmentation de conductivité ne dépend pas du type de nanoparticule (du moins dans le groupe "new").

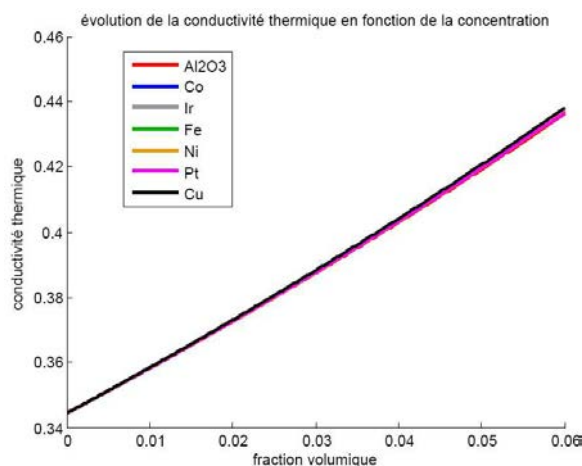


Figure 39: évolution de la conductivité thermique

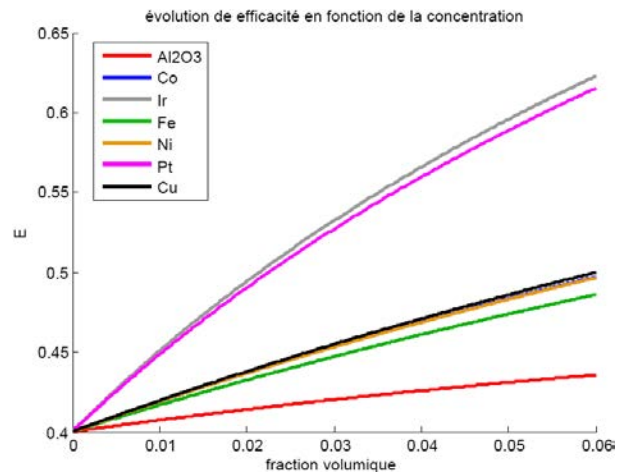


Figure 40: évolution de l'efficacité

Pour finir, la Figure 40 montre l'évolution de l'efficacité. Pour les meilleures nanoparticules, à savoir l'Iridium et le Platine, nous avons une augmentation de l'efficacité de 30 % (à concentration volumique de 6%) alors que cette augmentation n'était que de 15% dans la configuration précédente et ce aussi bien en laminaire qu'en turbulent.

4.3.2.2 Cas 3 : "Doublement du diamètre"

Notre troisième et dernier cas étudié porte sur la reprise du cas précédent mais nous doublons le diamètre interne de tube.

- Diamètre interne, $D_i = 0,0076$ m
- Diamètre externe $D_e = 0,0096$ m
- Diamètre hydraulique $D_h = D_i = 0,0076$ m
- Température de l'évaporateur $T_{fe} = -40^\circ\text{C}$
- Température d'entrée en échangeur $T_{ce} = -20^\circ\text{C}$
- Température de sortie en échangeur $T_{cs} = -25^\circ\text{C}$

Le débit massique et la longueur totale sont réévalués dès que le système change un de ses paramètres de base (aussi bien en régime laminaire que turbulent).

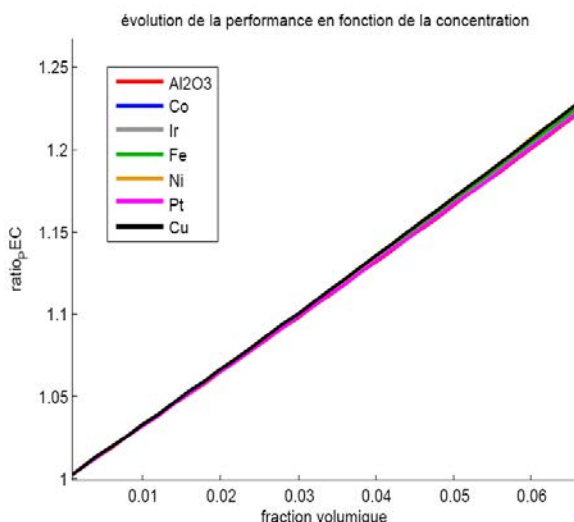


Figure 41: ratio_PEC en laminaire

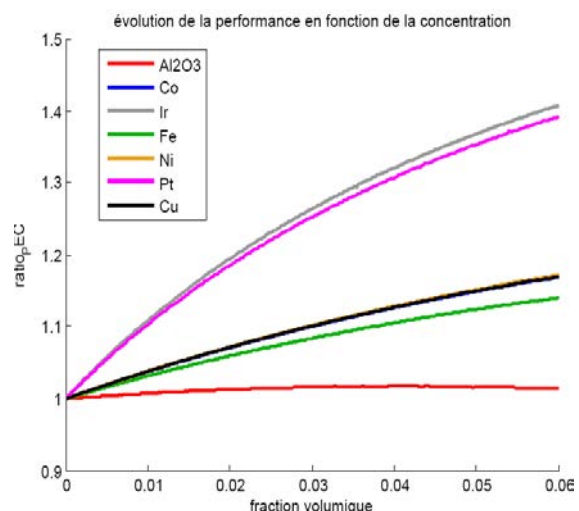


Figure 42: ratio_PEC en turbulent

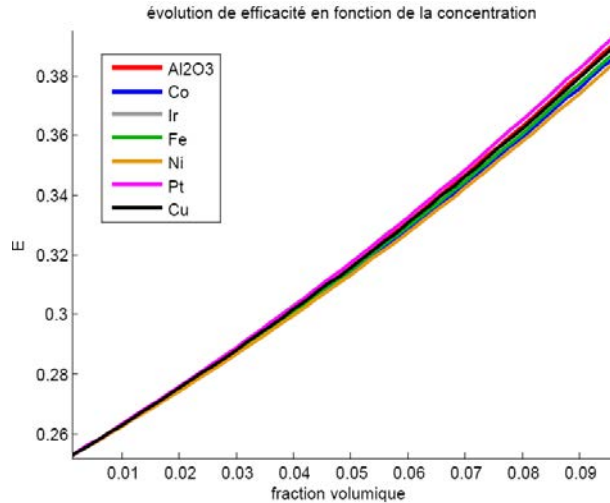


Figure 43: évolution de l'efficacité en laminaire

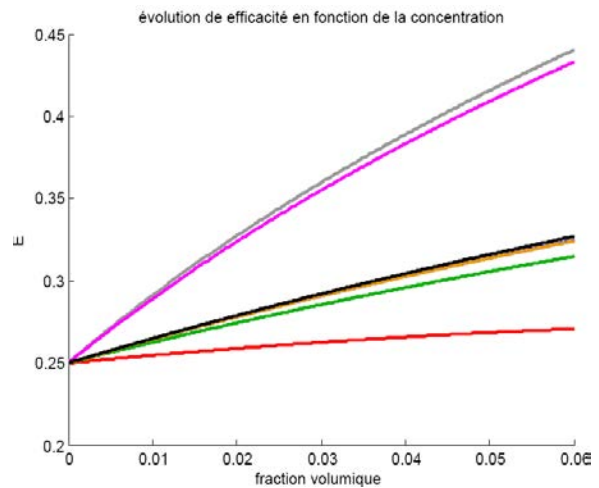


Figure 44: évolution de l'efficacité en turbulent

La Figure 41 montre que le ratio_PEC en laminaire est quasiment identique pour chaque nanoparticule. Pourtant, si on augmente la concentration volumique, on constate que le ratio_PEC le plus fort correspond au $\rho * Cp$ le plus fort (Figure 19).

En turbulent, on constate également que le plus fort ratio_PEC est celui de l'Iridium donc le produit $\rho^{17/44} * Cp^{1/3}$ le plus élevé. On remarque que le ratio_PEC est encore meilleur que dans le précédent cas, ainsi nous avons de nouveau optimisé la performance de notre nanofluide. L'efficacité quant à elle augmente, comme le montrent les Figure 43 et Figure 44, d'environ 60 % pour les meilleures nanoparticules à savoir Iridium et Platine.

4.4 Puissance thermique constante

4.4.1 Cas " Initial "

Du point de vue de l'industriel, il est préférable de faire l'étude de performance des nanofluides avec une puissance thermique constante, puisqu'en général c'est elle qui est fixé par l'opérateur. Aussi nous allons observer l'évolution de la puissance de pompage en fonction de la concentration en nanoparticules. Pour cela il nous faut d'abord évaluer la puissance thermique en fonction des différents paramètres dans le but de la maintenir constante:

$$\begin{aligned}\dot{Q} &= \dot{m} * Cp * E * (T_{ce} - T_{fe}) \\ &= \dot{m} * Cp * (T_{ce} - T_{fe}) * (1 - e^{-NUT}) \\ &= \dot{m} * Cp * (T_{ce} - T_{fe}) * \left(1 - e^{-\frac{\lambda * Nu * S}{\dot{m} * Dh * Cp}}\right)\end{aligned}$$

Par cette équation, nous allons pouvoir commencer par calculer le débit massique qui est la seule inconnue de l'équation, suivi du débit volumique, ce qui permet de lancer les calculs sur le transfert thermique.

La Figure 45 et Figure 46 nous montre que le ratio_PEC (en laminaire et en turbulent) est du même ordre de grandeur que pour l'évaluation à puissance de pompage constante. De plus on retrouve la même prédominance de nanoparticules pour les deux régimes.

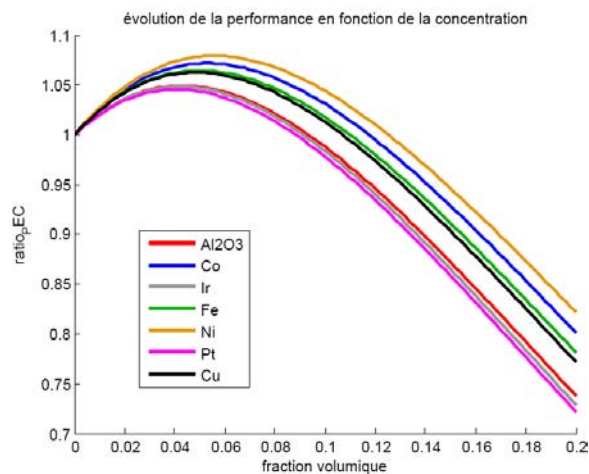


Figure 45 : ratio_PEC en laminaire

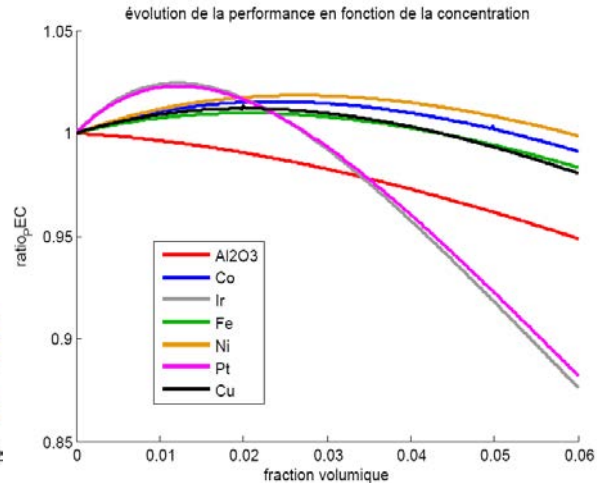


Figure 46: ratio_PEC en turbulent

Pour comprendre ces résultats, les Figure 47 et Figure 48 nous montrent l'évolution de la puissance de pompage. On remarque qu'elle diminue pour la plupart des nanoparticules pour une concentration volumique inférieure à 2 %, mais à première vue cette baisse n'est pas assez significative pour prouver à un industriel le réel intérêt des nanofluides.

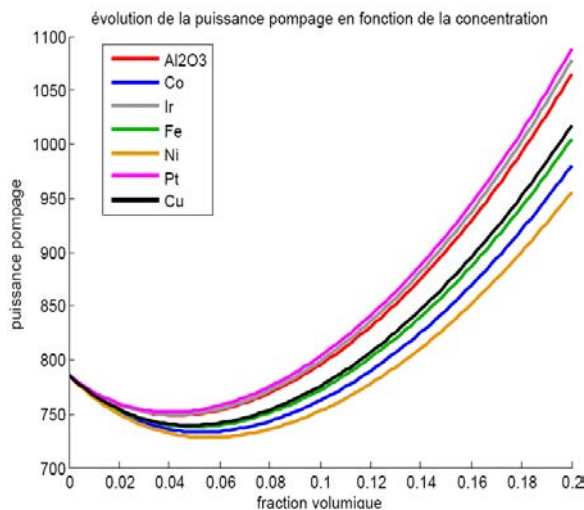


Figure 47 : Puissance de pompage en laminaire

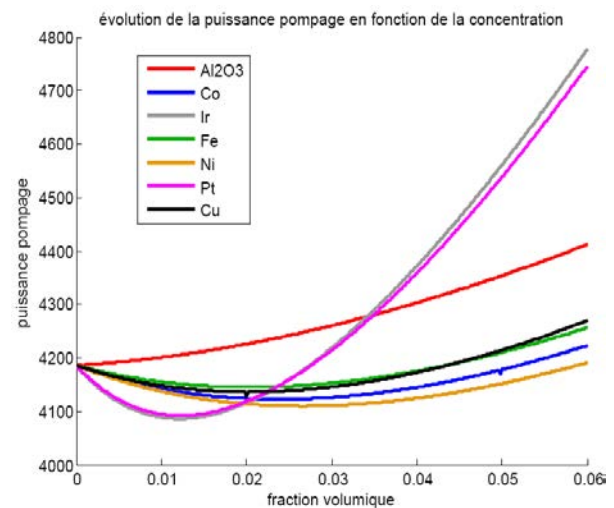


Figure 48: puissance de pompage en turbulent

Faisons une analyse de sensibilité des caractéristiques de cette puissance de pompage:

Laminaire:

$$\dot{W} = \dot{V} * \Delta P$$

$$= 128 * L * \mu * \frac{1}{\pi * Dh^4} * \dot{V}^2$$

$$\rightarrow \mu * \left(\frac{\dot{m}}{\rho}\right)^2$$

$$\rightarrow \mu * \rho^{-2} * \dot{m}^2$$

Turbulent:

$$\dot{W} = 0,316 * \left(\frac{4 * \rho *}{\mu * Dh * \pi} \right)^{-1/4} * L * \rho * \frac{8}{Dh * \pi^2} * \dot{V}^{2,75}$$

$$\rightarrow \rho^{-1/4} * \mu^{1/4} * \rho * \left(\frac{\dot{m}}{\rho} \right)^{2,75}$$

$$\rightarrow \rho^{-2} * \mu^{1/4} * \dot{m}^{2,75}$$

On remarque que ce qui différencie les deux régimes n'est plus la masse volumique mais l'importance accordée au débit volumique et à la viscosité. De plus, on considère que la viscosité reste la même pour toutes les nanoparticules ce qui engendre que le ratio_PEC dépend exclusivement du débit massique. Or :

$$Q = \dot{m} * Cp * (Tce - Tfe) * E = \dot{m} * Cp * (Tce - Tcs)$$

$$\dot{m} = \frac{Q}{Cp * (Tce - Tcs)}$$

Dans notre formule on constate que le seul paramètre qui dépend du type de nanoparticules est la capacité calorifique. En conclusion, la puissance de pompage va dépendre en laminaire de $\rho^{-2} * Cp^{-2}$ et en turbulent de $\rho^{-2} * Cp^{-2,75}$.

4.4.2 Cas 2 : " DeltaT = 20 "

Le deuxième cas d'étude semble montrer une nette amélioration de la performance des nanofluides par rapport au cas précédent, comme le montrent les Figure 49 et Figure 50.

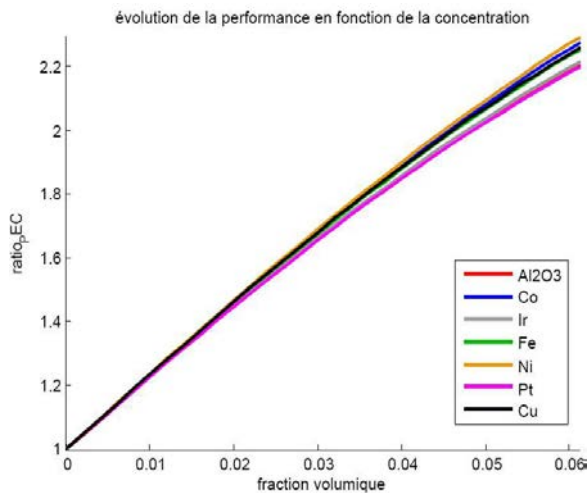


Figure 49: ratio_PEC en laminaire

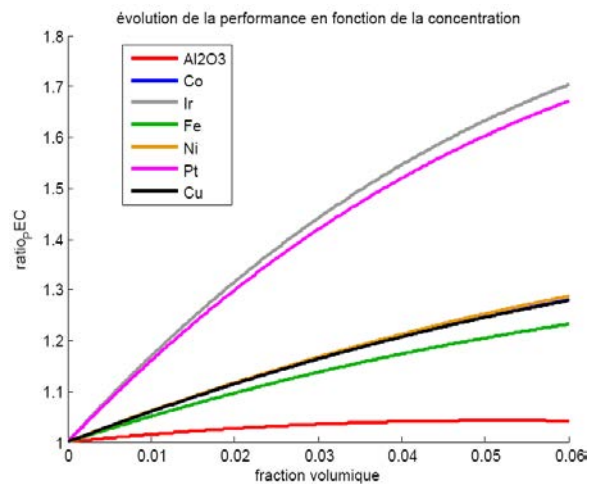


Figure 50: ratio_PEC en turbulent

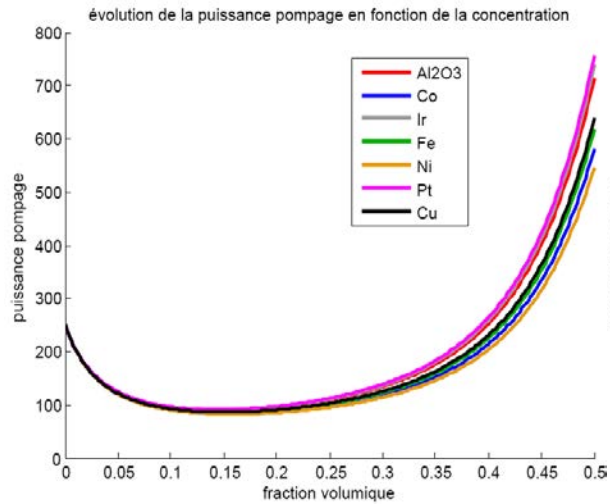


Figure 51: puissance de pompage laminaire

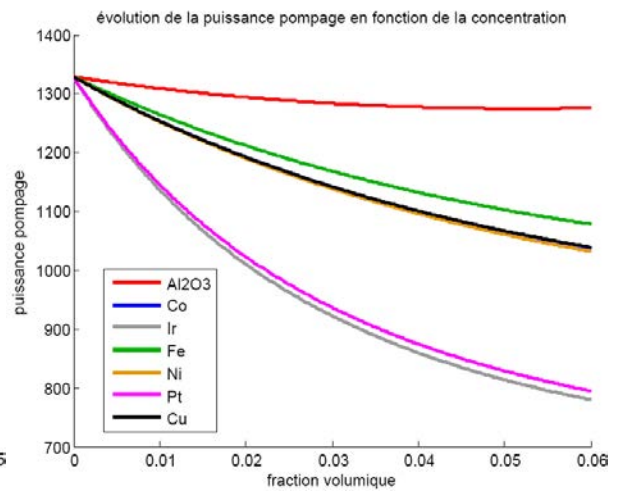


Figure 52: puissance de pompage turbulent

Les courbes du ratio_PEC (en laminaire et en turbulent) ont la même tendance que lors de nos tests en puissance de pompage constante. De plus, ce sont les mêmes nanoparticules qui sortent du lot comme le Platine et l'Iridium. Le dernier cas ("diamètre double") apporte les mêmes résultats que les deux autres cas, aussi l'annexe 3 développe ses observations.

4.5 Etude économique

Une étude économique a été réalisée dans le but de mesurer l'impact pour une industrie sur sa facture énergétique en employant des nanofluides. Nous avons donc conservé l'échangeur du cas 3 ("diamètre double"), le but étant d'évaluer le gain en consommation énergétique, et en fonction du nanofluide employé il nous faut évaluer le temps de retour sur investissement. Dans ce programme, l'industriel doit fournir les paramètres suivants :

- Puissance de pompage moyenne sur une année.
- Puissance thermique moyenne à fournir sur une année.
- Géométrie (Longueur de tube, diamètre).
- Température entrée/sortie et d'évaporateur.
- Prix du kWh.
- Volume de fluide caloporteur utilisé (ici nous en prendrons 20 L).

En fonction de ces paramètres, nous calculons sa facture énergétique à savoir le nombre de kWh/an. Puis selon les différents nanofluides, nous évaluons quelle est la concentration volumique optimale, c'est-à-dire celle dont la puissance de pompage est la plus faible. Une fois déterminée, nous calculons le poids en nanoparticules dont nous avons besoin, puis avec la liste de prix au kg, nous trouvons le prix du nanofluide. En d'autres termes, l'investissement supplémentaire de l'industriel est le prix du nanofluide. Celui-ci est considéré stable à vie, ce qui signifie que les 20 litres ne seront jamais changés.

Le programme nous rapporte ainsi l'économie sous forme de kWh économisés par an, puis avec le surcoût d'investissement nous déterminons le temps de retour sur investissement:

$$\text{Temps_retour(années)} = \frac{\text{surcoût_d'investissement(euros)}}{\text{économies_réalisées_par_an(euros)}}$$

Une fois le calcul effectué nous pouvons en ressortir le Tableau 16 :

Nanofluide	Temps_retour (années)
Al2O3	15.13
Co	4.59
Ir	52.80
Fe	5.78
Ni	4.93
Pt	44.22
Cu	4.5
SiO2	-
TiO2	21.95
Au	109.69
SiC	55.63
CuO	6.11

Tableau 16: temps de retour sur investissement pour les nanofluides

Les nanoparticules de cobalt, cuivre, fer, nickel et oxyde de cuivre sont à première vue les meilleurs candidates car le retour sur investissement est relativement rapide. Cependant les trois meilleures nanoparticules (platine, iridium, or) sont les moins rentables, ceci s'explique par le fait qu'elles sont très chères au kg, et que leurs masses volumiques étant importantes il faut une grande quantité pour obtenir 6% volumique dans le nanofluide. Cette étude permet donc de donner un premier aperçu de ce que peuvent apporter les nanofluides aux industriels,

pour être complet il manque encore des calculs avec l'ajout de tuyauteries pour le transport. Cette tuyauterie est différente selon l'industriel (coudes, etc...) tout comme le type d'échangeurs employés. Il est plus judicieux de travailler en puissance installée plutôt qu'en puissance moyenne car peu d'industriels connaissent leurs puissances moyennes. La puissance installée va pour cela dépendre du DJU qui se calcul tout les jours avec Météo France, ceci représente donc des paramètres en plus à ajouter au programme. Grâce au DJU, nous fonctionnerons en variation de débit suivant les températures extérieures.

En conclusion, les nanofluides sont très rentables à condition que le mélange reste stable dans le temps, le programme doit voir encore d'autres améliorations afin d'avoir un résultat encore plus juste vis-à-vis des installations des industriels et cela commencera par l'ajout de la tuyauterie ainsi que des puissances de pompage et thermique installées.

5 Expérimentations et résultats

5.1 Obtenir le nanofluide

5.1.1 Fournisseur

L'étude expérimentale des nanofluides suit la simulation numérique. Pour cela, nous avons décidé de faire une analyse de vieillissement et d'agglomération du nanofluide c'est-à-dire évaluer comment et en combien de temps le nanofluide passe du domaine stable au domaine instable. Cette étude comporte plusieurs étapes allant de la prise de contact avec les fournisseurs en nanoparticules à l'expérience en elle-même.

La première étape de cette analyse consiste à trouver les fournisseurs en nanoparticules ou en nanofluides. En effet, la plupart des fournisseurs de nanoparticules peuvent fournir un nanofluide déjà fait. Ainsi, après une période de recherche, aussi bien dans la littérature que sur le web, une liste de potentiels fournisseurs est établie et répertoriée dans le Tableau 17 :

<i>Fournisseurs</i>	<i>Pays</i>
Alfa Aesar	USA
Baikowski	France
Meliorum Technologies	USA
Mercop	USA
Mknano	Canada
Nanocyl	Belgique
Nano-oxides	USA
Nanophase	USA
Nanotech	Japon
Nissan chemical	Europe
Showa Denko Europe	France
Sigma Aldrich	USA
Skyspring nanomaterials	USA

Tableau 17 : liste des fournisseurs en nanoparticules

5.1.2 Prise de contact et de devis

Une étude de marché a permis d'obtenir des devis pour l'achat d'un nanofluide ou pour la fourniture de nanoparticules :

QUANTITY	DESCRIPTION	UNIT PRICE	AMOUNT
1	Platinum nanomaterial in aqueous solvent, 8 nm PPS, 50 mg in 30 mL	\$ 1,785	\$ 1,785.00
1	Platinum nanomaterial in organic solvent, 8 nm PPS, 50 mg in 30 mL	\$ 1,805	\$ 1,805.00
1	Platinum nanomaterial in aqueous solvent, 20 nm PPS, 50 mg in 30 mL	\$ 1,685	\$ 1,685.00
1	Platinum nanomaterial in organic solvent, 20 nm PPS, 50 mg in 30 mL	\$ 1,705	\$ 1,705.00
SUBTOTAL			\$ 6,980.00
TAX RATE			0.00%
SALES TAX			-
SHIPPING & HANDLING			\$ 185.00
TOTAL			\$ 7,165.00

SALESPERSON	SHIP METHOD	F.O.B.
Jennifer O'Neil	UPS International	Ship Point

TERMS:

Figure 53: exemple de devis sur un nanofluide à base de Platine

Comme l'aborde la Figure 53, le prix d'un nanofluide est relativement élevé. Aussi, nous avons tout d'abord recherché le prix des nanoparticules sous forme de poudre. Nous avons donc pu éditer un tableau pour chaque nanoparticule où sont nommés : le fournisseur, la taille, le prix de vente (quand il est disponible), ainsi que le temps d'expédition.

Plusieurs tableaux à l'image de l'Annexe 5 ont été réalisés pour les nanoparticules utilisées dans la simulation sauf l'iridium car beaucoup trop rare et donc cher. Une fois ces tableaux effectués, nous recherchons le fournisseur le moins cher pour chaque nanoparticule et plaçons ces résultats dans l'Annexe 6.

Selon ce tableau et nos simulations, il ne reste plus qu'à choisir quelle nanoparticule et quel fournisseur choisir.

5.1.3 Préparation du nanofluide

Etant donné que notre laboratoire ne dispose pas d'installations capables de manipuler en toute sécurité des nanoparticules sous forme nanopoudres, il est nécessaire de les recevoir en suspension dans un liquide tel que l'eau. Aussi, pour obtenir le nanofluide nous avons deux choix: soit en recevoir un tout fait avec surfactant et stable, soit le recevoir grossièrement en suspension, puis le faire soniquer par une entreprise ou un autre laboratoire, et préparer nous même le nanofluide selon nos désirs.

La deuxième option semble la meilleure aussi bien sur le coté économique que sur le coté expérience. En effet, le coût est beaucoup moins élevé et de plus nous pourrions maîtriser le contenu du nanofluide à savoir la concentration volumique en nanoparticule et en surfactant.

Nous avons donc pour cela contacté les différents fournisseurs pour obtenir soit des nanoparticules de cobalt, soit de fer soit de nickel. Nous avons donc cherché une entreprise ou un laboratoire susceptible de nous faire le mélange. Hielscher Ultrasonic dont le siège se trouve en Allemagne est leader dans les machines à ultrasons, et notre souhait est de fournir à

ce groupe l'eau glycolée à 50 % ainsi que les nanoparticules et qu'il nous fasse le mélange par sonication. Après plusieurs tentatives de contact, l'entreprise a refusé de faire ce mélange sous prétexte que notre laboratoire devait acheter leurs produits.

Nous avons donc changé les plans car la conception du nanofluide semble plus difficile que prévu. Nous avons utilisé une machine à ultrason qui avait servi pour une thèse 3 ans auparavant et la dispersion qu'elle offre semble convaincante. Cette machine se trouve en Annexe 7 et elle a une puissance de 300 W pour des ultrasons de 20 kHz.

Comme nous souhaitons observer l'agrégation et sédimentation d'un nanofluide, nous avons conclu que le choix de la nanoparticule importait peu, donc nous avons abandonné les nanoparticules performantes car trop chères telles que le platine pour nous concentrer sur des nanoparticules d'alumine puisqu'il y a une entreprise en France qui peut nous en fournir. C'est ainsi que la société Baikowski nous a fait parvenir deux échantillons de 250 mL chacun de nanofluide et composés de la manière suivante :

- 250 mL d'un mélange eau + alumine concentrée à 50 % massique.
- 250 mL d'un mélange eau + alumine concentrée à 75% massique.

Une fois le nanofluide reçu nous allons procéder aux différents mélanges afin de pouvoir faire plusieurs concentrations en nanoparticules grâce aux dilutions.

Le choix du surfactant est assez délicat, aussi selon Wang et al (2008), Yang et al (2011), et la société productrice de nanofluide Melorium Technology, le SDBS (sodium dodecylbenzenesulfonate) serait le plus approprié pour stabiliser à long terme le mélange par rapport à un échantillon ne possédant pas de surfactant. Il a donc fallu se fournir en SDBS afin de pouvoir faire nos échantillons et comparer l'effet du surfactant sur la répartition de nos nanoparticules.

5.2 Préparation des échantillons

5.2.1 Sans surfactant

Nous avons commencé la préparation de nos échantillons quelques temps avant que le surfactant n'arrive. Nous avons préparé quinze échantillons avec des concentrations en nanoparticules et en temps de sonication variables grâce à l'installation présentée en Annexe 7. La liste et la nomenclature sont présentées ci dessous et dans le Tableau 18 :

$$X = Y + A * S + T + ^\circ C + C + G$$

X = Nom de l'échantillon [A – Z]

Y = pourcentage volumique en nanoparticules

A = nombre de fois soniqué [1-2]

S = Soniqué ou non [0-1]

T = temps de sonication

°C = température à laquelle évolue l'échantillon

C = congelé

G = pourcentage de glycol (seuls les échantillons A et B ne sont pas à 50 % de glycol)

Echantillons sans surfactant (°C = ambiant sauf pour B)
A = 1% + 2S + 60 + G = 20%
B = 1% + 2S + 60 + C + G = 20%
C = 1 %+ 2S + 60
D = 0,1% + 2S + 60
E = 0,01 %+ 2S + 60
F = 0,001%+ 2S + 60
H = 1%
G = 1% + S + 15
I = 1% + S + 50
J = 0,5 %
K = 0,5% + S +50
L = 5%
M = 5% + S + 50
N = 2 %
O = 2% + S + 50

Tableau 18 : numérotation des échantillons sans surfactant

Le protocole expérimental est assez simple, nous nous sommes servis seulement du nanofluide ayant une concentration massique en nanoparticules de 50 % puis nous avons fait une dilution de telle sorte que nous ayons dans 60 mL une concentration volumique de 5 % en nanoparticules. Le fluide de base est de l'eau glycolée à 50 % massique, seulement nous ne disposons pas de glycol pur et c'est un glycol possédant certains additifs que nous avons utilisé. Nous avons fait une première dilution pour obtenir les échantillons H, J, L, N avant de passer à la sonication.

Sur ces quinze échantillons, on a pu remarquer assez vite la formation de deux couches (l'une blanche et l'autre rose) comme le montre l'annexe 8 , ceci marque le fait que le mélange n'est pas stable et c'est confirmé par les analyses MEB et MET (Annexe 12). Li et al (2007) fait également cette observation dans son article affirmant que le mélange n'est pas stable très longtemps si il n'y a pas de surfactant.

5.2.2 Avec surfactant

Une fois le surfactant reçu, les analyses bibliographiques telles que Wang et al (2008), Saterlie et al (2011), Li et al (2007) suggèrent que le SDBS aide grandement à la stabilité du mélange pour une durée bien plus longue qu'une semaine. La concentration optimale tourne autour de 0.9 % massique de SDBS dans le nanofluide, de ce fait nous avons préparé de nouveaux échantillons dont la table est la suivante :

P = 1% + S + 60 + SDBS = 0,2%
Q = 1% + S + 60 + SDBS = 0,6%
R = 1% + S + 60 + SDBS = 1%
S = 5% + S + 60 + SDBS = 1%

Tableau 19 : présentation des échantillons avec surfactant

Tous les échantillons sont de 40 mL et sont préparés et mélangés de la manière suivante :

- *Verser le glycol, l'eau, nanofluide reçu.
- *Peser le SDBS nécessaire.
- *Passage à la machine à ultrason pendant 60 min.

On divise chaque échantillons en quatre qui seront mis chacun à différentes températures: -80°C, -22°C, 2°C ,22°C. La stabilité quant à elle est mieux que pour le cas sans surfactant, seulement on observe deux phases à partir de 4 jours pour certains échantillons, l'Annexe 9 présente les échantillons après 12 jours de repos.

5.3 Exploitation des échantillons

5.3.1 Analyse MET

Nous avons besoin d'observer la répartition des nanoparticules dans l'eau glycolée, c'est pourquoi nous avons contacté le CNRS de Gif-sur-Yvette car il possédait un MET (microscope électronique à transmission) dont le fonctionnement est explicité dans l'annexe 10. Nous avons passé deux demi-journées au CNRS afin d'effectuer nos observations.

*Première demie journée : observation des échantillons sans surfactant. Nous avons passé sur le MET nos échantillons et avons remarqué une grande agglomération et ce pour tous les échantillons passés au microscope. La taille des nanoparticules quant à elle semble correspondre assez bien à la description du produit par le fournisseur. Nous avons la majeure partie de nos nanoparticules à 120-130 nm et une moindre partie à 40 nm comme le montre la Figure 54. En revanche, l'agglomération a créé une multitude de nanoparticules dépassant les 300 nm. Il y a trois explications possibles: la première est que lors du séchage de la goutte sur la grille nous avons eu une agglomération, la deuxième est que la sonification n'était peut être pas assez puissante et longue, et enfin que le mélange reçu à l'Irstea n'était peut être pas conforme à la description du fournisseur. A l'issue de cette demi-journée, nous avons clairement observé le fait que notre instabilité du mélange venait du fait que notre agglomération était beaucoup trop importante.

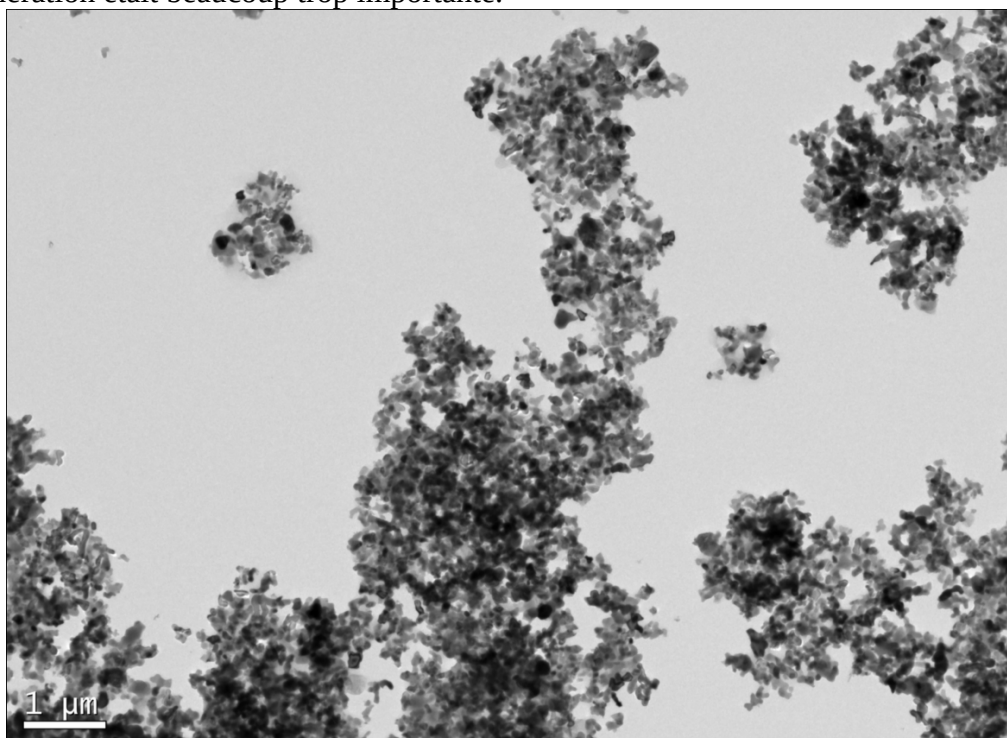


Figure 54 : observation des échantillons sans surfactant

*Deuxième demi-journée : nous sommes revenus trois semaines plus tard. Nous présentons les quatre échantillons de nanofluide avec surfactant, et au vu des photos de la précédente fois, nous avons dilué 10 fois chaque échantillon avec de l'eau glycolée à 50 %. Nous avons toujours de l'agglomération mais moins que lors de notre première demie journée, ceci est plutôt encourageant car on remarque le réel intérêt du surfactant dans la stabilité du mélange. En revanche, nous avons fait deux séries de mesures car les premiers échantillons n'étaient pas totalement secs lors de leur introduction dans le microscope, mais les résultats restent globalement les mêmes.

Le problème de l'agglomération persiste encore (Figure 55) puisque malgré l'ajout du surfactant, nous n'arrivons pas à maintenir le mélange stable et ceci se traduit par les agrégats observés au MET. Il y a donc deux hypothèses qui apparaissent à l'issue de ces observations:

- Notre nanofluide n'est pas de bonne qualité à la base.
- Notre machine à ultrason n'est pas assez performante. Il nous faut donc essayer de refaire le mélange avec une autre machine à ultrason afin de bien cerner l'origine de notre problème de stabilité.

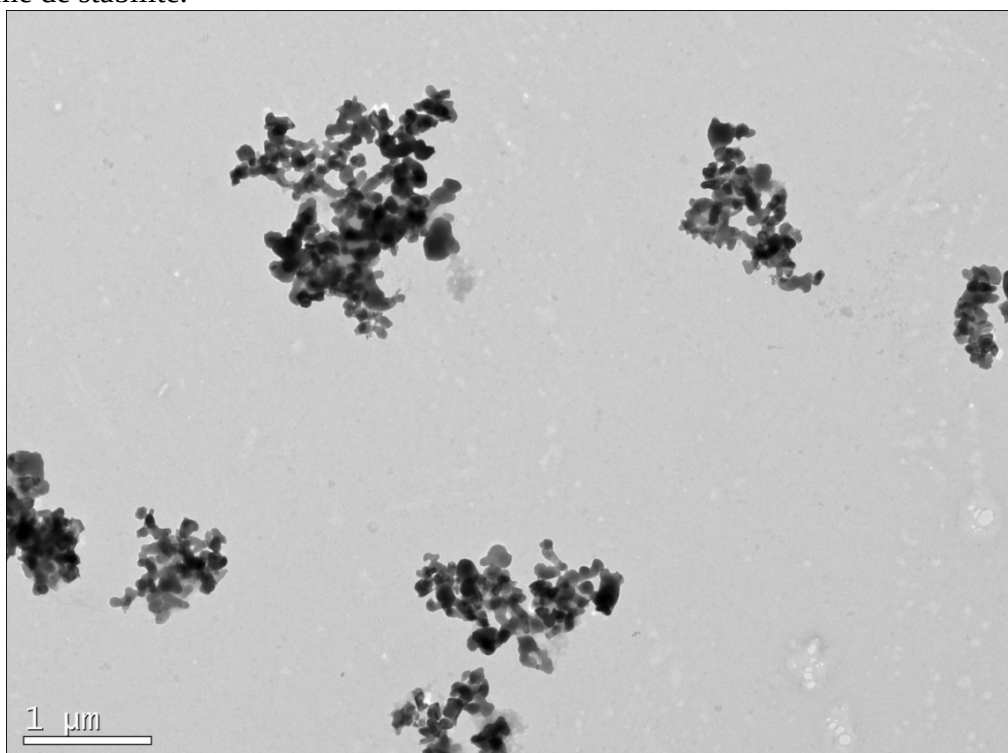


Figure 55 : observation des échantillons avec surfactant

5.3.2 Analyse MEB

Lors de nos recherches sur les moyens et les laboratoires permettant de mesurer la taille des nanoparticules, nous avons pris contact avec le CEA de Saclay. Ce dernier possède un MEB (microscope électronique à balayage) dont le fonctionnement est explicité en Annexe 11. Compte tenu des difficultés pour placer un rendez vous sur la plate forme du CEA, au cours du stage seuls les échantillons sans surfactant sont passés. Les résultats sont quasiment les mêmes que ceux observés lors de la première demie journée au CRNS, les nanoparticules sont très agglomérées. Nous passons quatre échantillons au MEB:

A = 1% + 2S + 60 + G = 20%
B = 1% + 2S + 60 + C + G = 20%
C = 1 %+ 2S + 60
D = 0,1% + 2S + 60

On remarque effectivement que le mélange est mal dispersé car nous avons beaucoup d'agglomérats. Nous observons également que la taille des nanoparticules est loin d'être la même : nous en avons à 130 nm, quelques unes à 40 nm et d'autres à presque 200 nm. Ceci est valable pour les quatre échantillons, ce qui confirme un problème dans la méthode de dispersion. Ensuite il y a encore des tests ultérieurs à faire pour déterminer quels éléments perturbent la stabilité de notre mélange. En revanche, l'élément positif de cette observation est que nous avons trouvé la concentration qui semble être optimale pour observer correctement l'échantillon soit une concentration volumique de 0,1%. L'Annexe 12 et la Figure 56 présente les échantillons vus sous différentes échelles, et étant donné que le technicien qui nous a reçus travaille également sur les nanoparticules, sa première conclusion est que le problème de dispersion vient soit de notre nanofluide reçu par Baikowski ou alors de notre

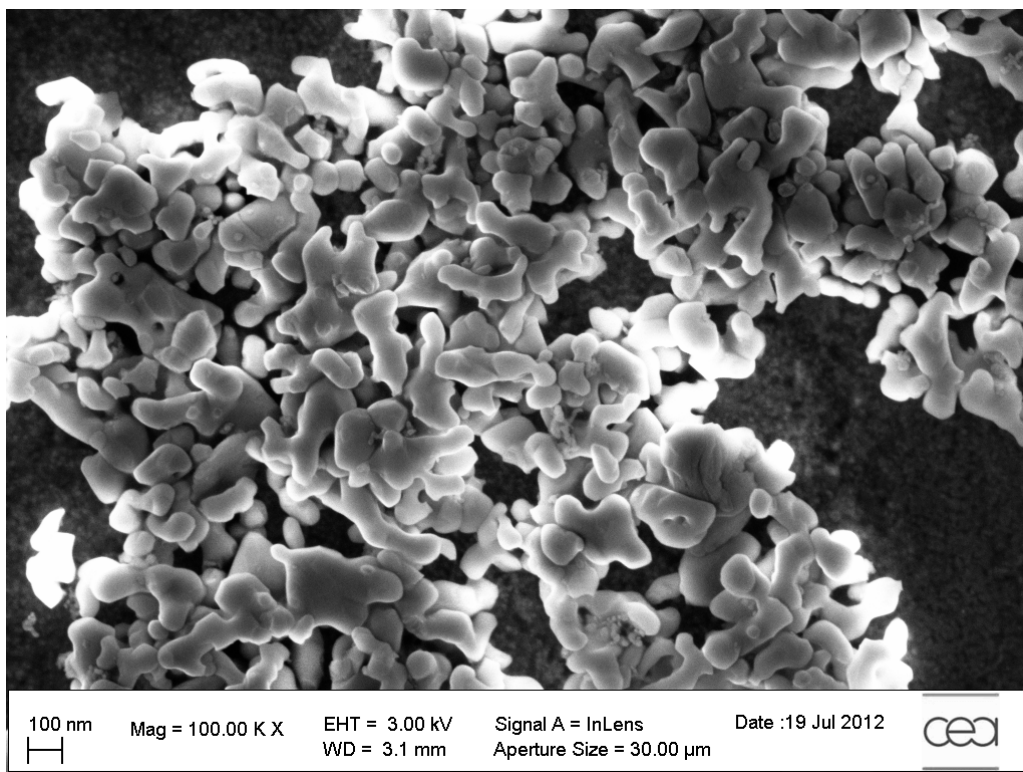


Figure 56 : observation des échantillons sans surfactant

5.3.3 Analyse PCS

Cette analyse a été menée au CEA de Saclay en parallèle de l'étude sur MEB. En règle générale les deux études sont effectuées ensemble pour être sûr de la fiabilité des résultats. Le PCS est un appareil permettant de mesurer la taille moyenne des nanoparticules et le concept est simple:

- Placer un échantillon de 2 ou 3 mL dans l'enceinte fermée.
- L'échantillon est traversé par un laser qui va mesurer la vitesse brownienne des nanoparticules.
- Avec un algorithme de conversion, la vitesse des nanoparticules donne une taille moyenne qui est retranscrite sur ordinateur.

Nous avons un obstacle pour l'observation, il nous faut un mélange plus ou moins transparent et à part nos échantillons de 0,1 à 0,001% les autres apparaissent trop concentrés. De ce fait, nous avons dilué l'échantillon C avec de l'eau jusqu'à ce que l'échantillon soit transparent. Ensuite, il nous faut trouver les indices de réfraction de l'alumine, de l'eau glycolée à 50 % ainsi que la viscosité de notre mélange. Les premiers résultats indiquent que nous avons de gros agglomérats, de l'ordre de 1 μm environ, qui ont l'air d'être hors gamme pour le PCS. La taille moyenne de notre échantillon sort de la gamme de tailles que peut analyser le PCS (il analyse de 1 nm à 1 μm et notre population mesurée est supérieure à 1 μm). Ainsi les résultats ne sont pas tout à fait fiables et accompagnent bien les résultats trouvés avec le MEB et le MET car notre population de nanoparticules est beaucoup trop imposante.

La conclusion sur l'étude PCS montre qu'il y a un problème sur la dispersion et que notre mélange n'est pas stable. Bien sûr, ce résultat était un peu prévu étant donné qu'il n'y a pas le surfactant. C'est pourquoi la technicienne nous a proposé de lui envoyer des échantillons de notre fluide de base et de notre nanofluide afin qu'elle puisse elle-même faire la dispersion et permettre ainsi de comprendre où le problème de la stabilité se situe. Cependant, les résultats ne seront connus que vers début septembre, de ce fait les premiers résultats sur les analyses des échantillons sont assez catégoriques : il faut revoir et améliorer la dispersion de nos nanoparticules.

6 Conclusion

Cette étude sur les nanofluides nous a permis de comprendre une chose essentielle: les nanofluides sont une voie vers une amélioration des dépenses énergétiques et des transferts thermiques. En revanche, le principal problème est de maintenir le nanofluide stable dans le temps afin que la viscosité ne vienne pas freiner cette performance.

Notre étude bibliographique a relevé le fait que les nanofluides ont une viscosité très élevée dans le monde du froid ce qui a pour conséquence de diminuer la performance de ce dernier. Les œuvres ont également soulevé le fait que les corrélations actuellement employées notamment pour l'évaluation de la viscosité et de la conductivité thermique n'étaient pas appropriées et sous estimaient très souvent le résultat expérimental obtenu. De plus les nouvelles corrélations proposées n'ont pas été encore vérifiées par d'autres équipes scientifiques ce qui permettrait de mieux les généraliser.

L'étude numérique quant à elle a révélé que les nanofluides sont effectivement supérieurs au fluide caloporteur traditionnel et qu'ils accroissent très rapidement les transferts thermiques. De plus, en se basant sur les chiffres EDF, la simulation a montré que pour un industriel les nanofluides ne reviendraient pas aussi cher que les fluides caloporteurs actuels, ce qui présage donc que ces premiers sont une alternative encourageante pour l'optimisation énergétique d'une industrie, ou tous types d'installations nécessitant l'emploi de fluides caloporteurs pour des échanges thermiques. Pour finir, la simulation nous a révélé que les nanoparticules possédant une forte masse volumique telles que le platine ou l'or étaient les plus chères et les plus performantes. Seulement, ces dernières figurent parmi les nanoparticules les plus chères, l'intérêt d'utiliser ces nanoparticules doit être évalué en fonction des besoins de l'industriel intéressé.

Notre expérimentation nous a permis de voir que l'agglomération se formait plus vite sans l'ajout d'un surfactant tel que le SDBS que nous avons utilisé. Ces résultats sont très importants car le nanofluide reste une technologie assez récente et non maîtrisée parfaitement, et l'une des clés du futur succès de cette technologie réside dans le contrôle de l'agglomération et de la stabilité du mélange. Il y a donc une véritable technique de maintenance de la stabilité à développer puisque pour l'instant on ne sait pas si la totalité des nanoparticules pouvant être utilisées réagissent toutes de la même manière face à l'ajout de tel ou tel surfactant. La technique de sonication permet de casser les agglomérats qui s'y sont formés et limite la vitesse d'agglomération, seulement cette technique est en général utilisée lors de l'élaboration du nanofluide. Du coup au vue des vitesses d'agglomération il est préférable d'envisager la piste de devoir utiliser les ultrasons plus souvent (une fois par semaine par exemple) pour maintenir la stabilité.

7 Bibliographie

Aladag, B., S. Halelfadl, N. Doner, T. Maré, S. Duret and P. Estellé (2012). "Experimental investigations of the viscosity of nanofluids at low temperatures." Applied Energy.

Asirvatham, L. G., N. Vishal, S. K. Gangatharan and D. M. Lal (2009). "Experimental study on forced convective heat transfer with low volume fraction of CuO/water nanofluid." Energies **2**: 97-119.

Duangthongsuk, W. and S. Wongwises (2009). "Measurement of temperature-dependent thermal conductivity and viscosity of TiO₂-water nanofluids." Experimental Thermal and Fluid Science **33**(4): 706-714.

Ferrouillat, S., A. Bontemps, J.-A. Gruss, O. Poncelet and O. Soriano (2010). "Influence du facteur de forme des nanoparticules sur les performances thermiques d'un nanofluide." Société Française de Thermique.

Ferrouillat, S., A. Bontemps, J.-P. Ribiero, J.-A. Gruss and O. Soriano (2011). "Hydraulic and heat transfer study of SiO₂/water nanofluids in horizontal tubes with imposed wall temperature boundary conditions." International Journal of Heat and Fluid Flow **32**: 424-439.
Gruss, J.-A. and J.-P. Ribiero (2009). "Nanofluides pour les applications thermiques." Technique de l'ingénieur **nm5115**.

Ho, C. J., L. C. Wei and Z. W. Li (2010). "An experimental investigation of forced convective cooling performance of a microchannel heat sink with Al₂O₃/water nanofluid." Applied Thermal Engineering **30**(2-3): 96-103.

Kole, M. and T. K. Dey (2011). "Effect of aggregation on the viscosity of copper oxide-gear oil nanofluids." International Journal of Thermal Sciences **50**(9): 1741-1747.

Kulkarni, D. P., D. K. Das and S. L. Patil (2007a). "Effect of Temperature on Rheological properties of copper oxide nanoparticles dispersed in propylen glycol and water mixture." Journal of Nanoscience and Nanotechnology **7**(7): 2318-2322.

Kulkarni, D. P., D. K. Das and R. S. Vajjha (2009). "Application of nanofluids in heating buildings and reducing pollution." Applied Energy **86**(12): 2566-2573.

Kulkarni, D. P., P. K. Namburu and D. K. Das (2007b). Comparison of heat transfer and fluid dynamic performance of nanofluids. NSTI Nanotechnology conference and trade show, Santa clara, NSTI Nanotech 2007.

Li, X., D. Zhu and X. Wang (2007). "Evaluation on dispersion behavior of the aqueous copper nano-suspension." Journal of Colloid and Interface Science **310**: 456-463.

Longo, G. A. and C. Zilio (2011). "Experimental measurement of thermophysical properties of oxide-water nano-fluids down to ice-point." Experimental Thermal and Fluid Science **35**(7): 1313-1324.

Maré, T., S. Halelfadl, O. Sow, P. Estellé, S. Duret and F. Bazantay (2011). "Comparison of the thermal performances of two nanofluids at low temperature in a plate heat exchanger." Experimental Thermal and Fluid Science **35**(8): 1535-1543.

Namburu, P. K., D. K. Das, K. M. Tanguturi and R. S. Vajjha (2008). "Numerical study of turbulent flow and heat transfer characteristics of nanofluids considering variable properties." International Journal of Thermal Sciences **48**(2): 290-302.

Namburu, P. K., D. P. Kulkarni, D. Misra and D. K. Das (2007). "Viscosity of copper oxide nanoparticles dispersed in ethylene glycol and water mixture." Experimental Thermal and Fluid Science **32**(2): 397-402.

Prasher, R., D. Song, J. Wang and P. Phelan (2006). "measurements of nanofluid viscosity and its implications for thermal applications." Applied Physics Letters **89**.

Sahoo, B. C., R. S. Vajjha, R. Ganguli, G. A. Chukwu and D. K. Das (2009). "Determination of rheological behavior of aluminium oxyde nanofluid and development of new viscosity correlations." Petroleum Science and Technology **27**: 1757-1770.

Saterlie, M., H. Sahin, B. Kavlicoglu, Y. Liu and O. Graeve (2011). "Particle size effects in the thermal conductivity enhancement of copper-based nanofluids." Nanoscale Research Letters **217**(6).

Timofeeva, E. V., J. L. Routbort and D. Singh (2009). "Particle shape effects on thermophysical properties of alumina nanofluids." Journal of Applied Physics **106**.

Timofeeva, E. V., W. Yu, D. M. France, D. Singh and J. L. Routbort (2010). "Nanofluids for heat transfer: An engineering approach." Nanoscale Research Letters **6**(1): X1-7.

Wang, X. J., X. Li, N. Wang, X. Y. Wen and Q. Long (2008). "Influence of SDBS on stability of Al₂O₃ nano-suspensions." Nanophotonic, Nanostructure, and Nanometrology **6831**.

Yang, L., K. Du, X. Niu, Y. Li and Y. Zhang (2011). "An experimental and theoretical study of the influence of surfactant on the preparation and stability of ammonia-water nanofluids." International Journal of Refrigeration **34**: 1741-1748.

Yu, W., D. M. France, D. S. Smith, D. Singh, E. V. Timofeeva and J. L. Routbort (2009). "Heat transfer to a silicon carbide/water nanofluid." International Journal of Heat and Mass Transfer **52**: 3606-3612.

Zhang, X., H. Gu and M. Fujii (2007). "Effective thermal conductivity and thermal diffusivity of nanofluids containing spherical and cylindrical nanoparticles." Experimental Thermal and Fluid Science **31**(6): 593-599.

8 Annexes

Annexe 1 : évolution de la viscosité

D.P. Kulkarni et al./ Applied Energy 86 (2009) 2566–2573

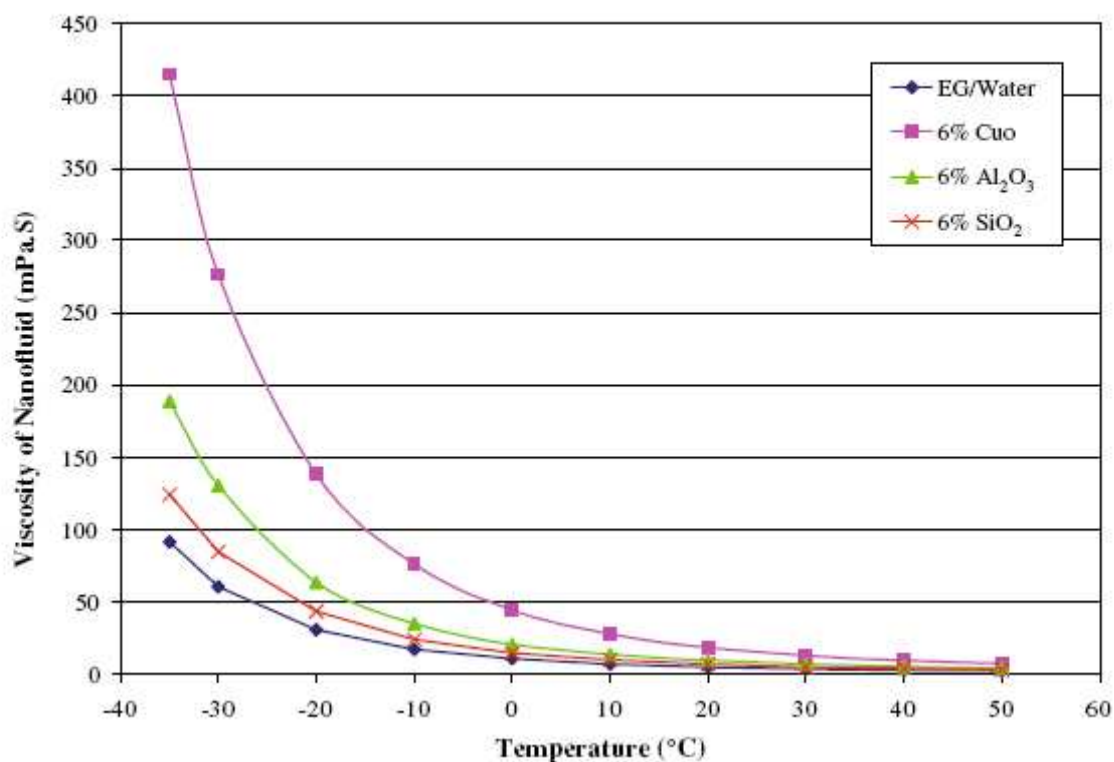


Figure 57 : évolution de la viscosité en fonction de la température

Annexe 2 : Courbes des propriétés de l'eau glycolée à 50 %

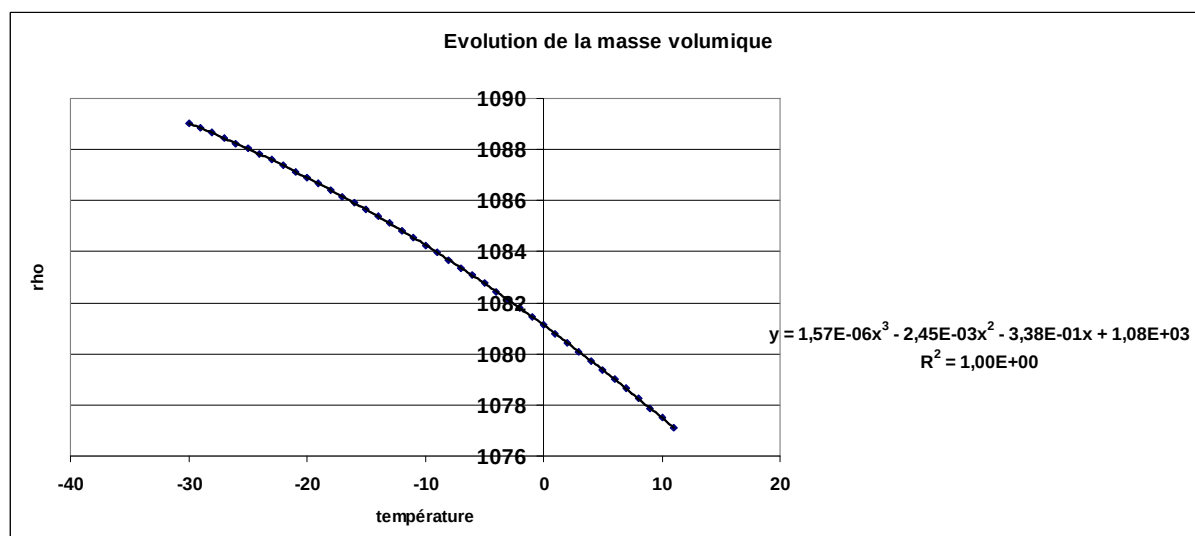


Figure 58 : évolution de la masse volumique de l'eau glycolée à 50 %

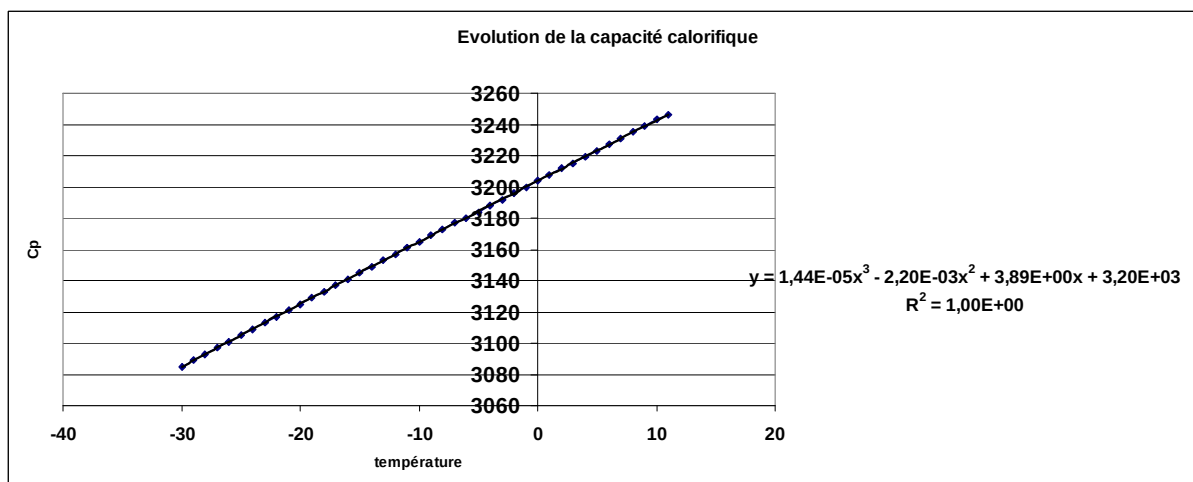


Figure 59 : Capacité calorifique de l'eau glycolée à 50%

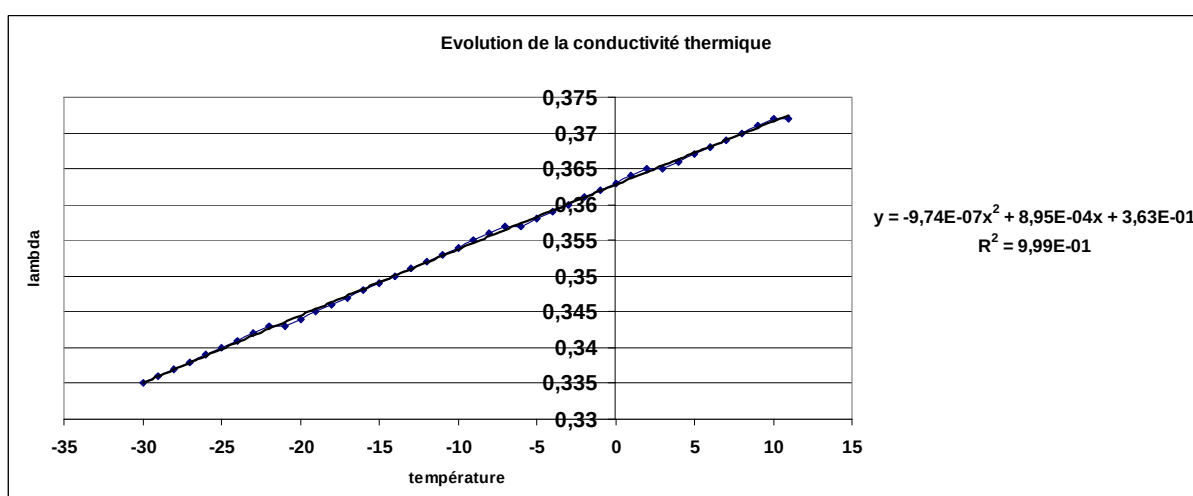


Figure 60 : conductivité thermique de l'eau glycolée à 50 %

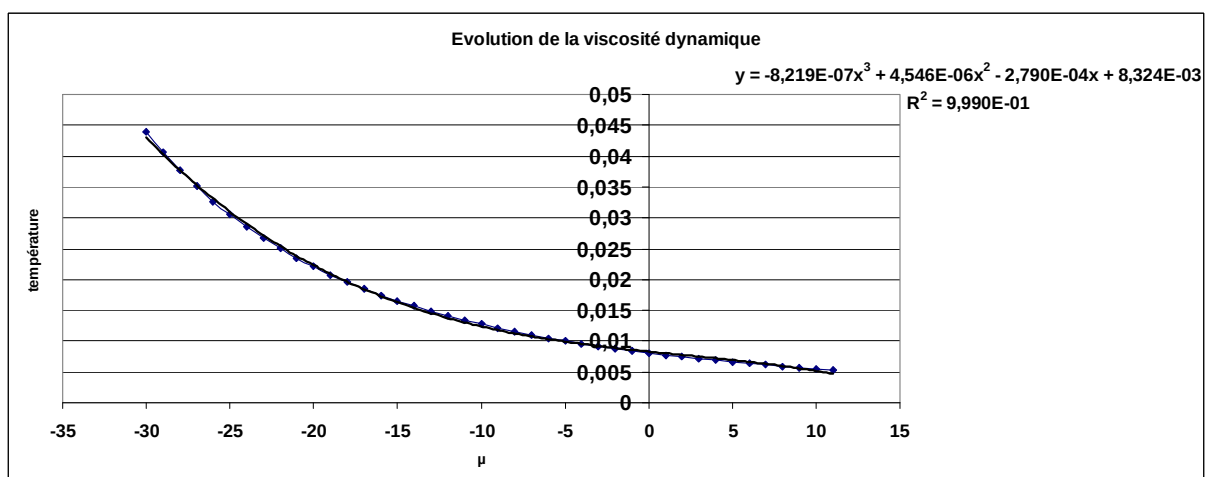


Figure 61 : viscosité de l'eau glycolée à 50 %

Annexe 3 : Cas "diamètre double" à puissance thermique constante

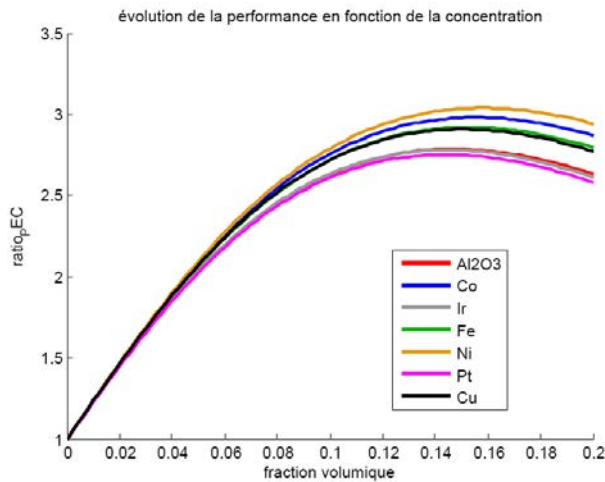


Figure 62 :ratio_PEC en laminaire

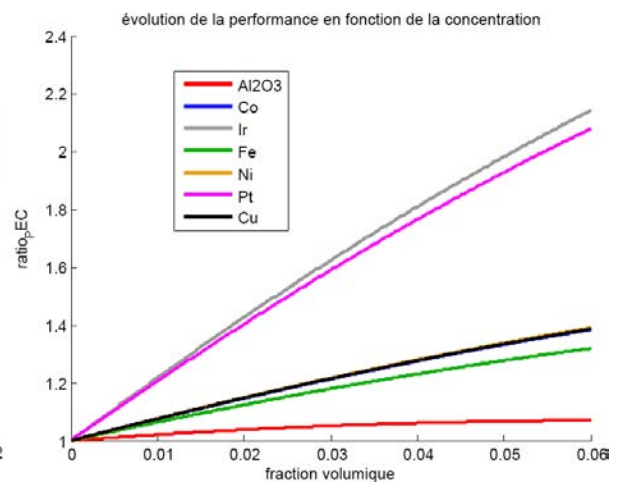


Figure 63 :ratio_PEC en turbulent

On constate la même observation que pour les deux précédents cas. Nous avons toujours une meilleure performance des nanofluides par rapport aux fluides de base. On remarque également que la puissance de pompage diminue beaucoup sur les Figure 64 et Figure 65, ceci est donc conforme avec tous les résultats déjà obtenus auparavant.

Ainsi, en conclusion, les nanofluides sont plus performants que les fluides caloporteurs basiques tels que l'eau ou l'eau glycolée.

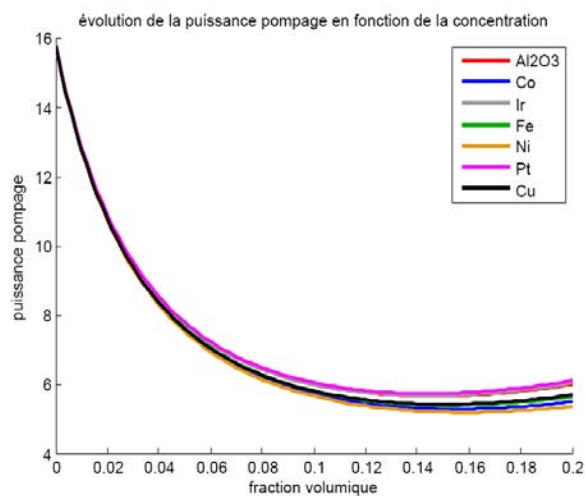


Figure 64 : puissance de pompage en laminaire

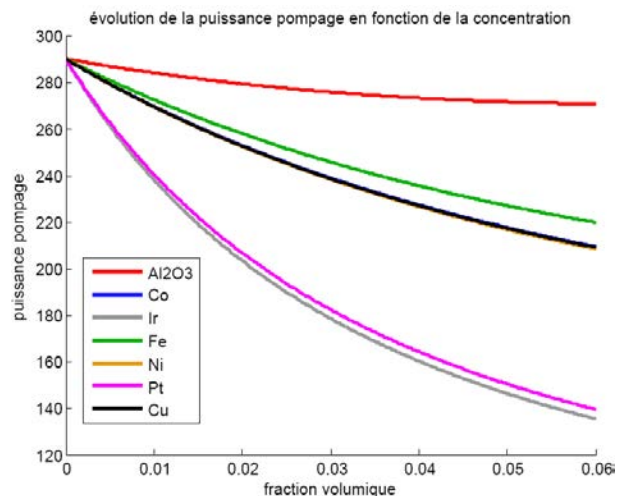


Figure 65 : puissance de pompage en turbulent

Annexe 4 : Liste des nanoparticules choisies pour la simulation

Nanoparticul e	Masse volumique ($kg.m^{-3}$)	Capacité calorifique ($kJ.kg^{-1}.K^{-1}$)	Conductivité ($W.m^{-1}.K^{-1}$)
Al₂O₃	3970	765	50
Au	19300	150	320
Co	8865	421	99.2
Cu	8960	380	401
CuO	6315	350	76.5
Fe	7870	447	80.2
Ir	22500	130	147
Ni	8900	444	90.7
Pt	21450	133	71.6
SiC	3160	675	490
SiO₂	2650	745	13.4
TiO₂	4157	710	7.9

Annexe 5 : Prix et fournisseurs pour Al_2O_3

Fournisseur	Tailles	Prix	Temps
Alfa Aesar	20 à 45 nm	-	1-3 semaines
Baikowski	20 à 50 nm	140 € / kg	1 à 7 jours
Mkano	15 - 30 nm	45\$ / 100g	-
Nanotek	20 à 45 nm	-	-
Sigma Aldrich	<50 nm	90 € / 100g	1- 4 semaines
Nanoamor	20-30 nm	80\$ / 100g et 120\$ / kg	1-4 semaines

Annexe 6 : Liste et prix des nanoparticules

Nanoparticule	Tailles	Prix	Temps
Al₂O₃	20 à 50 nm	35 euros / 100 g	1 à 7 jours
Au	90 nm	1539 \$ / 5g	1-4semaines
Co	20 nm	352 \$ / 100g	1-2semaines
Cu	60-80 nm	215 \$ / 100g	1-2 semaines
CuO	40 nm	75 \$ / 100g	1-2 semaines
Fe	20 nm	337 \$ / 100g	1-2semaines
Ni	20 nm	349\$ / 100 g	1-2semaines
Pt	15 nm	7000 \$ / 100g	1-4semaines
SiC	40 nm	129 \$ / 100g	1-2semaines
SiO₂	20 nm	75 \$ / 100g	1-4 semaines
TiO₂	10 - 30 nm	80 \$ / 100 g	1-4 semaines

Annexe 7 : Présentation de l'installation expérimentale



Explication du fonctionnement de la machine :

- A : minuterie qui permet de sélectionner le temps de sonification désiré.
- B : Uniquement si les ultrasons sont en intermittence, on règle avec ce bouton le cycle de sonification sur la durée désirée (ex : si on règle à 50 et que la minuterie est à 30 min, la machine aura pulsé en tout 15 min).
- C : réglage de la puissance transmise à la sonde.
- D : Permet de régler les ultrasons en intermittence ou en continu. Précisons que la sonde chauffe moins vite en intermittence et le mélange est plus efficace.
- E : Permet de trouver la fréquence de coupure afin d'avoir le maximum de puissance pour la plus faible fréquence possible
- F : directement relié à E, en réglant ce dernier, on règle la puissance délivrée à la machine et non à la sonde.

Annexe 8 : Echantillons de nanofluide sans surfactants



Figure 66 : photo des échantillons sans surfactant

La photo a été prise 2 jours après la préparation des échantillons marquant le fait qu'il y a un problème de stabilité du mélange.

Annexe 9 : Echantillons de nanofluide sans surfactants



Figure 67 : photo des échantillons avec surfactant

La photo de la Figure 67 à également été prise deux jours après la préparation des échantillons, on voit que la stabilité est améliorée par rapport aux échantillons sans surfactant.



Figure 68 : photo des échantillons avec surfactant

La Figure 68 montre une photo des échantillons après 12 jours de repos, on constate que le mélange n'est plus stable. Notons tout de même que le mélange à 5% a perdu sa stabilité moins vite que les échantillons à 1% pour une raison encore peu claire.

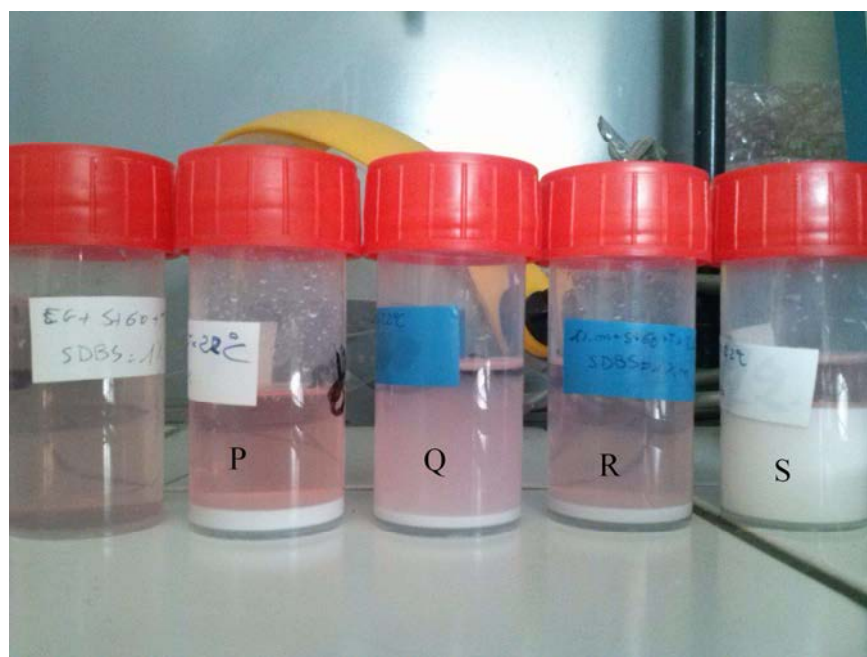


Figure 69 : photo des échantillons avec surfactant

La Figure 69 montre une photo des échantillons après 7 jours de repos, on constate que les mélanges à 1% volumique ne sont plus stables tandis que celui à 5% le reste un peu plus longtemps. La raison est encore assez obscure, mais nous pensons que la dilution et le

mélange dans l'eau glycolée de notre nanofluide ne se fait pas correctement même avec une heure de passage aux ultrasons.

Annexe 10 : Présentation du MET

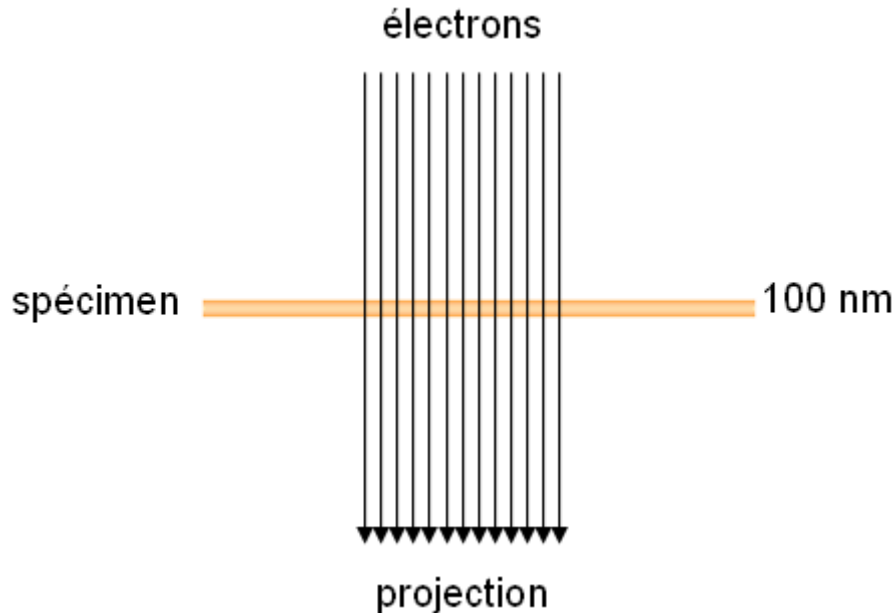


Figure 70 : fonctionnement du MET

Protocole expérimental:

- *Dépose de l'échantillon sur une grille (trois microlitres sont déposés sur cette grille),
- *5 min d'incubation,
- *Ajout du contrastant,
- *Séchage (on laisse sécher la goutte pendant environ 10 min) ,
- *Observation sur le microscope (Figure 71).

Comme l'indique la Figure 70, les électrons traversent l'échantillon et ceux qui n'ont pas touché de nanoparticules donnent un aperçu de la taille des nanoparticules. Cette méthode permet d'observer les nanoparticules à une échelle de l'ordre de 0,2 nm, la résolution est donc très bonne mais le gros défaut est que lors de l'étape de séchage il y a un gros risque d'agglomération. Il y a une deuxième méthode pour observer les nanoparticules avec le MET : la cryo-microscopie. Cette méthode débute de la même manière que la précédente:

- *Dépose de l'échantillon sur une grille (toujours trois microlitres),
- *Buvardage, on place une fine couche sur l'échantillon pour le protéger.
- *Plonge de l'échantillon dans de l'éthane liquide.
- *Observation à froid de l'échantillon au microscope.

Cette méthode a un principal avantage ainsi qu'un inconvénient:

*avantage = il n'y a pas de risque d'agrégation puisqu'on observe à froid l'échantillon donc dans son état naturel.

*inconvénient = selon l'épaisseur du buvard la résolution sera plus ou moins bonne.

Il y a un léger problème pour nous puisque leur CNRS vient juste de recevoir le matériel adéquate pour réaliser cette cryo-microscopie, ainsi ce n'est pas sûr qu'on puisse faire l'observation de cette manière.



Figure 71: MET du CNRS de Gif-sur-Yvette

Annexe 11 : Présentation du MEB

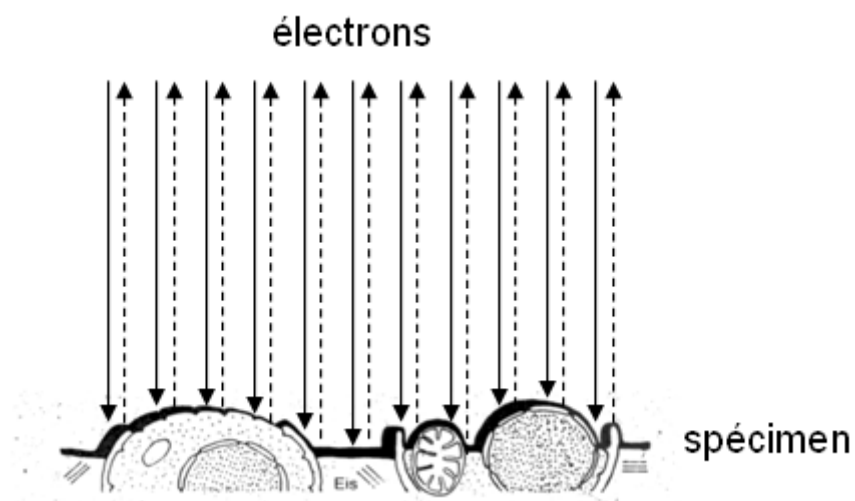


Figure 72 : Fonctionnement du MEB

Le protocole expérimental est le même que pour le MET, la différence entre ces deux microscopes est que les électrons ne traversent pas l'échantillon. Une fois la surface de l'échantillon touchée, les électrons remontent ce qui permet de faire une observation de la surface (Figure 72) tandis que le MET fait une observation de la projection de l'échantillon. Autre différence comme le montre la Figure 73, le MEB est bien plus petit que le MET.



Figure 73 : MEB du CEA de Saclay

Annexe 12 : Photos observées avec le MEB et le MET

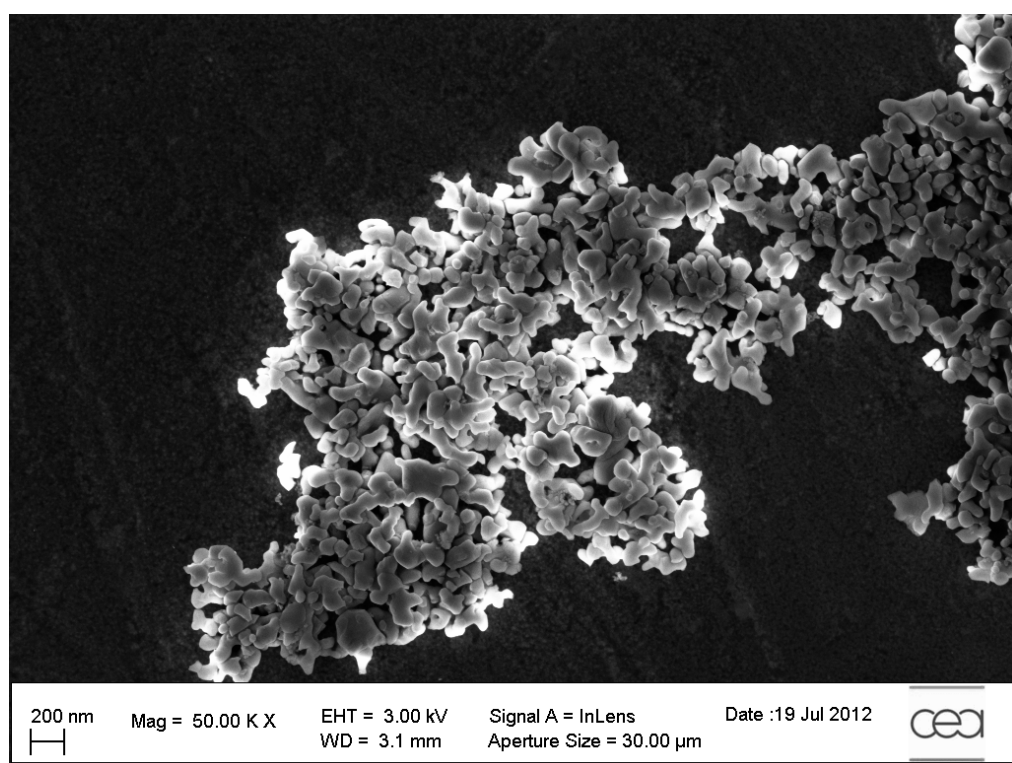


Figure 74 : photo des échantillons sans surfactant avec le MEB du CEA de Saclay

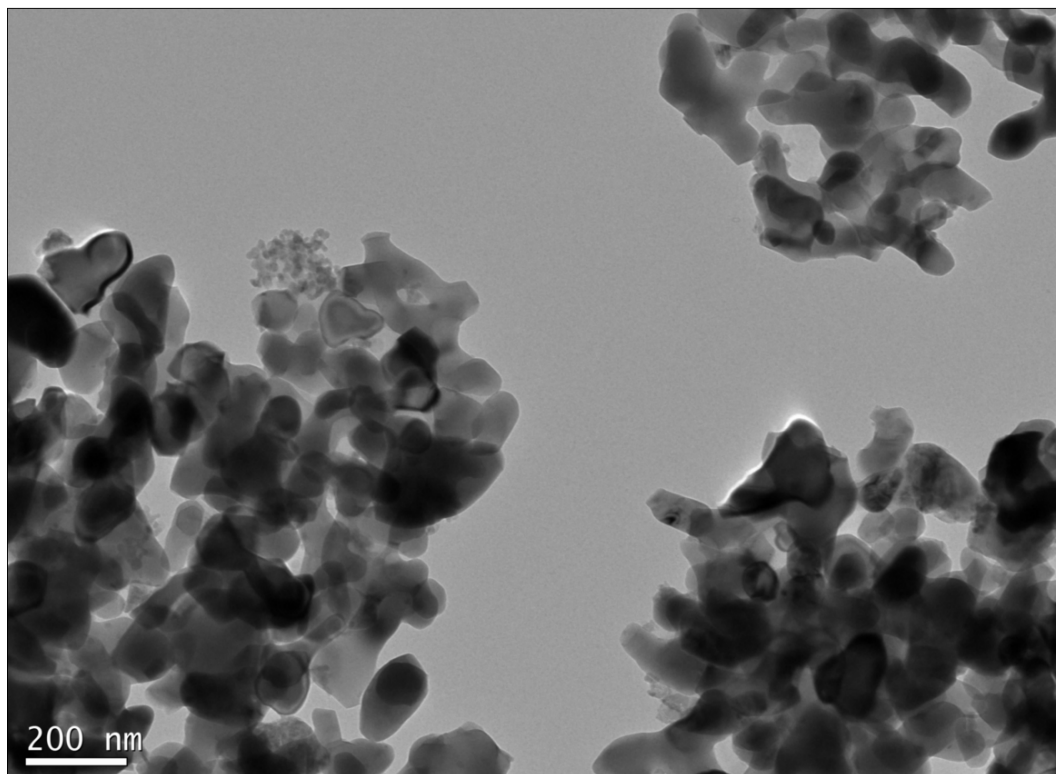


Figure 75 : photo des échantillons sans surfactant avec le MET

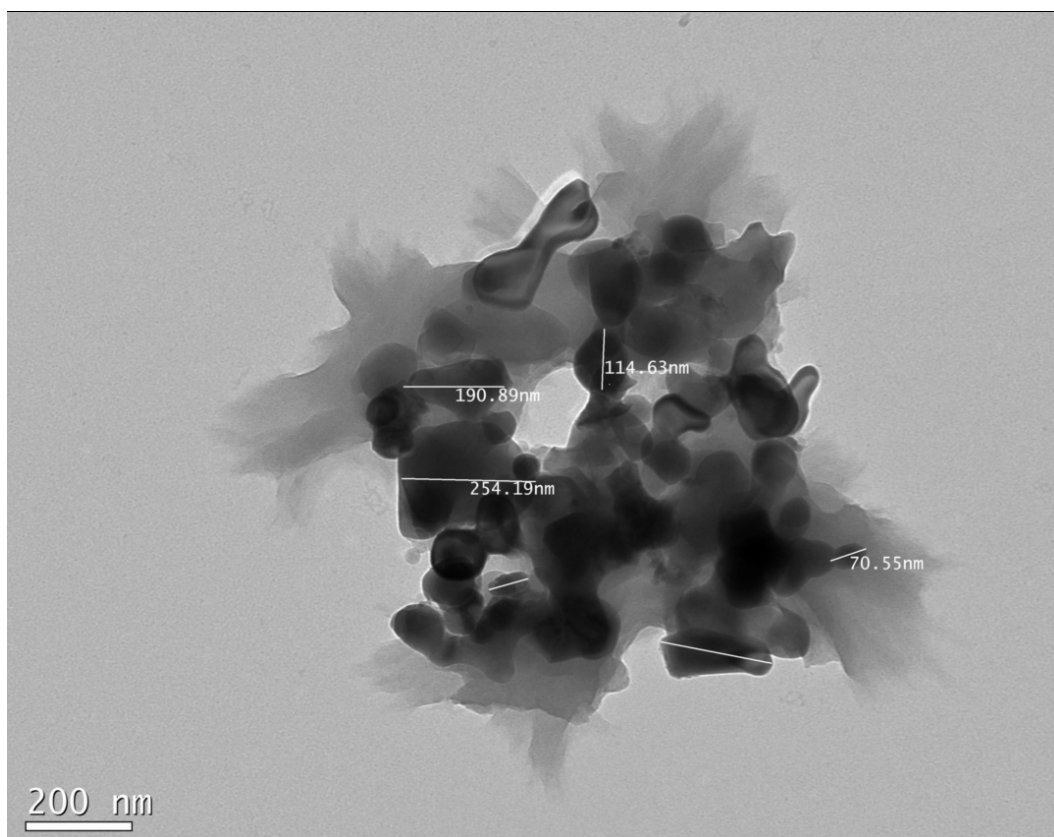


Figure 76 : photo des échantillons avec surfactant sur le MET

La Figure 76 montre qu'il y a moins d'agglomérats dans l'échantillon avec surfactant que celui sans surfactant. Cela montre que le surfactant a l'effet qu'on souhaite, mais il y a toujours un problème dans la dispersion.