

**Université 8 mai 1945 Guelma
Faculté des Sciences et de la Technologie**

Département de Génie Mécanique



**Mémoire de Fin d'Etudes
Pour l'Obtention du Diplôme de Master**

Présentée par : RAMDANI Hamza

Option : Conception Production Industrielle

=====

Titre de mémoire :

***Etude d'un Capteur Solaire
Photovoltaïque/Thermique à Base de
Nano-fluide***

=====

Sous la Direction de :

Pr. CHERIF OULD LAHOUCINE

Année universitaire 2015/2016

Sommaire

Liste des tableaux.....	i
Liste des figures.....	ii
Nomenclature.....	vii
Introduction générale	1
Chapitre I : Etat de l'Art sur les Capteur Hybrides PVT	
1.1 L'énergie solaire photovoltaïque	3
A-Principe de conversion.....	3
B-Technologie de cellule PV.....	3
C- L'Assemblage PV.....	4
D-Influence de la température.....	5
1.2. L'énergie solaire thermique.....	5
a. La surface Absorbante.....	6
b. Couverture transparente.....	6
c. Système de transfert de chaleur par le fluide.....	7
d. L'isolant	7
1.3. Le couplage PVT (hybride) :.....	7
1.4 Importance des panneaux PVT	8
a-Rôle des nanoparticules.....	9
b-Rôle de fluide de base.....	19
c-Rôle de tensioactifs (surfactants).....	20
Chapitre II: Les Nano-fluides et leurs Propriétés Thermiques	
2-1- Introduction	22
2-2-Les propriétés thermo-physiques effectives du nano-fluide.....	22
a-La Masse volumique.....	22
b-La chaleur spécifique.....	23
c-Coefficient d'expansion thermique.....	25
d-La viscosité dynamique.....	26

Sommaire

d-1-Les différents modèles de viscosités.....	26
e-Conductivité thermique des nano-fluides.....	27
I-Méthodes de mesures de la conductivité thermique.....	27
II- Modèles des conductivités thermiques	28
II-1-Modèle de Maxwell.....	29
II-2-Modèle de Hamilton-Crosser.....	29
II-3-Modèle de Bruggeman.....	30
II-4- model de Fricke :.....	31
Chapitre III : Modélisation du Nouveau Capteur Hybride PVT, Bilan Thermique et Algorithme de Calcul	
3-1. Introduction	38
3-2. Composition des rayons de soleil.....	38
3-3. Présentation du capteur étudié.....	42
3-4. Modèle thermique.....	43
3-5. Hypothèses Simplificatrices Proposées.....	43
3-6. Bilan thermique du capteur hybride PV/T à base de nano-fluide proposé..	44
3-7. Algorithme de Calcul.....	49
3-8. Conclusion.....	55
Chapitre IV : Résultats et Discussions	
4-1.Aperçus sur le Chapitre 4.....	56
4-2. Propriétés Thermiques du Nano-fluide ZnO-Eau Nano-fluide.....	56
1) la masse volumique.....	56
2) Chaleur Spécifique C_p (J/kg.K).....	57
3) Viscosité Dynamique μ (Pa.s).....	57
4) Conductivité Thermique du Nano-fluide λ (W/m.K).....	58
5) Estimation des Conductivités Thermiques des Nanostructures ZnO présents dans le Nano-fluide ZnO-Eau de l'étude de S. Ferrouillat et al.....	58
4 -3. Effet du nombre de Reynolds.....	59

Sommaire

4 -4. Effet du Rayonnement Solaire Incident Q_{solaire}	61
4 -5. Effet de la Hauteur H du Canal de Refroidissement.....	63
4 - 6. Effet de la Température Ambiante.....	64

Introduction Générale

Le refroidissement d'un capteur photovoltaïque est un problème de grande importance surtout pour des pays chauds comme l'Algérie. L'énergie utile qu'elle soit thermique ou électrique produire à partir de l'énergie solaire contribue non seulement à la réduction des effets de serre mais aussi aux développements des régions enclavés qui n'ont aucun accès aux différentes sources d'énergies.

Cependant, le rendement d'une cellule PV comme tout système de conversion thermodynamique, voit son rendement diminuer par les irréversibilités de l'entropie produite suite à l'augmentation de la température. Cette étude est d'une importance cruciale pour notre pays du fait qu'on se trouve dans la région du monde où la température moyenne est une des plus la plus élevée.

Le refroidissement des cellules PV constitue un des axes de recherche actuellement en vogue un peu partout dans le monde, mais aussi depuis quelques années à l'université du 8 Mai 1945 de Guelma. Le capteur hybride photovoltaïque/thermique utilisant l'eau ou l'air reste donc une approche très attractive pour attaquer ce problème.

En Juin 2014, un mémoire de master a été soutenu par l'étudiant Kaidouchi Hicham, traitant le problème du capteur PVT à eau et à air. L'étudiant dans sa thèse a utilisé le logiciel COMSOL Multiphysics pour modéliser et simuler le capteur. Comme résultat important dans ce mémoire, il ressort que dans le cas d'un capteur hybride PVT à eau, il est préférable d'utiliser un canal rectangulaire épousant la même surface que celle du panneau PV au lieu du système classique à serpentin, généralement utilisé pour ces systèmes. De plus, il paraissait qu'il n'est pas nécessaire d'utiliser des ailettes pour le refroidissement du capteur photovoltaïque dans le cas où le fluide est de l'eau, ceci est dû au fait que l'eau possède une bonne conductivité thermique, éliminant de fait l'utilisation des ailettes.

Cependant, pour le cas de l'air, et à cause justement de sa faible conductivité thermique, l'utilisation des ailettes devient incontournable. H. Kaidouchi a essayé d'aborder ce problème, malheureusement, l'utilisation de COMSOL requiert de simuler un système tridimensionnel, ce qui s'est traduit non seulement par un calcul impossible à satisfaire sur PC même en utilisant le cluster de l'université.

Tenant compte de ces contraintes et de l'importance du thème, une autre approche a été adoptée en définissant un autre sujet de master soutenu en Juin 2015 par M. Ould Sid Ahmed. L'étudiant a étudié le capteur hybride PVT à air en gardant le canal de refroidissement rectangulaire, mais en y ajoutant des ailettes de refroidissement en alliage d'aluminium.

Le présent mémoire de master, s'attaque à un autre problème traitant le PVT. Il concerne un refroidissement en utilisant un nano-fluide dont le fluide de base est de l'eau, et les nanoparticules du ZnO. Au tout début du travail, il a été décidé de garder la même configuration du PVT à eau étudié par H. Kaidouchi, en ajoutant juste le nano-fluide, et voir si des différences existent entre ces deux systèmes ou non.

Par la suite, en étudiant l'état de l'art sur le sujet en question et les caractéristiques du rayonnement solaire dans l'eau, un changement majeur dans la configuration du PVT transforma cette dernière, en y ajoutant plus de complications de modélisation et simulation. Il a été décidé de placer le canal de refroidissement non pas en dessous du capteur PV comme c'est le cas dans presque toutes les études antérieures, mais plutôt en haut du PV permettant ainsi au rayonnement direct du spectre visible d'atteindre la surface des cellules

Introduction Générale

photovoltaïques. Une modélisation quasi-complète sur les points de vue thermique et mécanique des fluides a été faite en considérant un transfert de chaleur monodimensionnel, en régime permanent, avec un écoulement laminaire et totalement établi. L'équation différentielle obtenue à partir du bilan sur un volume de contrôle, une fois résolue, donna la distribution des températures dans le fluide caloporteur. Quelques paramètres influents sur les rendements électrique, thermique, global, ainsi que la température du PV, ont été étudiés. Une comparaison entre un capteur Hybride PVT à eau et un autre au nano-fluide ZnO-eau a été faite. Les résultats des calculs ont été obtenus en utilisant un programme de calcul en Fortran 90 développé au cours de ce travail.

L'organisation du présent mémoire s'articule sur quatre chapitres. Le premier concernera des généralités sur l'énergie solaire, ses différentes applications et systèmes de conversions thermique et photovoltaïque. Une bonne partie de ce chapitre sera consacrée évidemment aux capteurs hybrides photovoltaïque/thermique à eau et à air, et à nano-fluides.

Le second chapitre élucidera quelques caractéristiques des nano-fluides, les différentes corrélations ainsi que leurs limites utilisées pour déterminer les propriétés thermo-physiques telles que ; la chaleur spécifique, la viscosité dynamique, et aussi la conductivité thermique.

Le chapitre 3, constitue le cœur du travail, il est consacré à la modélisation du nouveau capteur hybride PVT à eau et nano-fluide. Le bilan thermique avec les hypothèses de bases et les simplifications sont clairement exposées. Ce chapitre sera finalisé bien entendu par l'algorithme de calcul.

Le chapitre 4 sera dévolus complètement aux résultats des simulations avec discussion de toutes les figures présentées tout en mettant en relief certain faits et observations qui méritent une plus grande attention surtout la réponse à la question 'est-ce-que réellement le nano-fluide ZnO-eau améliore le transfert de chaleur ou non ?' Une conclusion termine ce travail de master.

1.1 L'énergie solaire photovoltaïque :

A-Principe de conversion

Un panneau photovoltaïque produit de l'électricité à partir de la lumière du soleil, grâce à des cellules assemblées en modules. La lumière du soleil est composée de particules d'énergie appelées photons. Lorsque la cellule semi-conductrice absorbe suffisamment de lumière solaire, des électrons sont arrachés aux atomes de la cellule par les photons et créent un courant électrique.

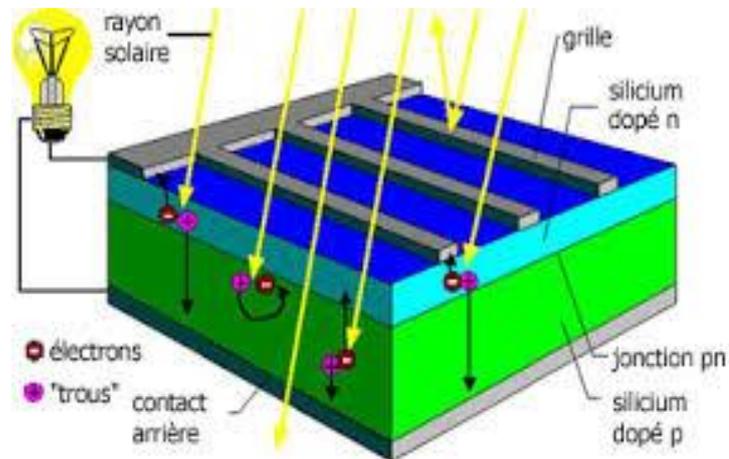


Figure 1- 1: Principe de Conversion de l'Energie Solaire

B-Technologie de cellule PV :

Les cellules photovoltaïques les plus répandues sont constituées de semi-conducteurs, principalement à base de silicium qui est l'élément le plus abondant sur terre après l'oxygène, il apparaît sous forme de dioxyde SiO_2 , appelé plus communément silice. Le silicium est extrait à l'échelle industrielle par un mécanisme d'oxydoréduction, de la silice à faible teneur en oxyde de fer est mise en contact de composés carbonés, le tout étant porté à très haute température 3000°C dans des fours électriques à arc. On obtient du silicium de qualité métallurgique, pur à 98%, qui devient de qualité dite « électronique » après des opérations supplémentaires de purification.

Le silicium occupe une place prédominante au sein de l'industrie photovoltaïque grâce à ces nombreux avantages : disponibilité, qualités photovoltaïques assurant au final un bon rendement de conversion, non toxique. Enfin, il est aisé de modifier les propriétés électriques du silicium en introduisant dans la matrice cristalline des atomes dopants tels que le Bore (induisant un dopage de type P) et le Phosphore (induisant un dopage de type N).

Le silicium se présente sous différentes formes dont les plus répandues sont le silicium polycristallin, le silicium monocristallin et le silicium amorphe.

C- L'Assemblage PV :

Les modules (ou panneaux) photovoltaïques sont constitués d'une plaque de verre transparent, d'une résine en EVA (Ethylène-Vinyl Acétate) enrobant les cellules, d'une couche anti-reflet, et d'un film de Tedlar, le tout placé dans un encadrement en aluminium. Le but de cette association est d'obtenir une tension suffisante grâce à la connexion en série de plusieurs cellules (souvent 2 groupes de 18 mis en parallèles), ainsi que de protéger les cellules et leurs contacts métalliques contre les conditions climatiques.

Les tensions classiques des modules vont de 12V à 18V, pour des puissances allant de quelques watts à 150W. Le sandwich ainsi réalisé pour un module est présenté sur le schéma ci-dessous.

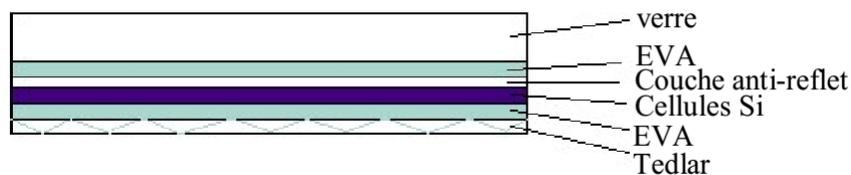


Figure 1- 2: Coupe d'un module photovoltaïque

Les fonctions et caractéristiques physiques de ces divers matériaux sont données dans le tableau ci-dessous (λ = conductivité thermique ; e = épaisseur du matériau considéré).

Tableau. 1.1. Les fonctions et caractéristiques physiques de ces divers matériaux.

	Fonction	Caractéristique
Plaque de verre	Transparente, résistante aux chocs (notamment la grêle), de faible teneur en fer (le verre ordinaire absorbe une partie importante des rayonnements de $X > 600$ nm à cause de sa teneur en fer), ce verre présente l'avantage d'une étanchéité excellente et d'une haute transmission du rayonnement solaire.	$\lambda_{\text{verre}} = 1 \text{ w}/(\text{m.k})$ $e_{\text{verre}} = 3 \text{ mm}$
EVA	Matériau d'enrobage : bonne résistance aux UV, stable en température.	$\lambda_{\text{eva}} = 0,23 \text{ w}/(\text{m.k})$ $e_{\text{eva}} = 0,5 \text{ mm}$
Couche anti-reflet	Empêche la réflexion de la lumière solaire incidente	$\lambda_{\text{car}} = 1,38 \text{ w}/(\text{m.k})$ $e_{\text{car}} = 100 \mu\text{m}$
Cellules PV	Fine tranches planes fabriquées à partir de matériaux semi-conducteurs. La majorité des cellules solaires sont en silicium. Film en PVF (polyvinyl-fluoride) protégeant l'arrière du PV contre l'humidité.	$\lambda_{\text{si}} = 148 \text{ w}/(\text{m.k})$ $e_{\text{si}} = 0,4 \text{ mm}$

Tedlar Le Tedlar blanc a le pouvoir de réfléchir une partie de la lumière qui est parvenue à travers les cellules. $\lambda_{ted} = 0,36w/(m.k)$
 $e_{ted} = 0,1mm$

D-Influence de la température :

Le rendement d'un PV indique le taux de transformation de la puissance solaire en puissance électrique. En moyenne, le rendement d'un panneau photovoltaïque est compris entre 7% et 16% essentiellement selon la technologie silicium choisie. Il est important à ce stade de noter que la température de la cellule a une influence non négligeable sur son rendement. Ainsi, plus la température de la cellule augmente, plus le rendement est faible. On mesure généralement une dégradation de la puissance de 0,4% à 0,5% par °C.

Le graphique suivant, représentant l'évolution de la puissance délivrée par un ensemble de modules PV en fonction de la température, met en évidence ce phénomène :

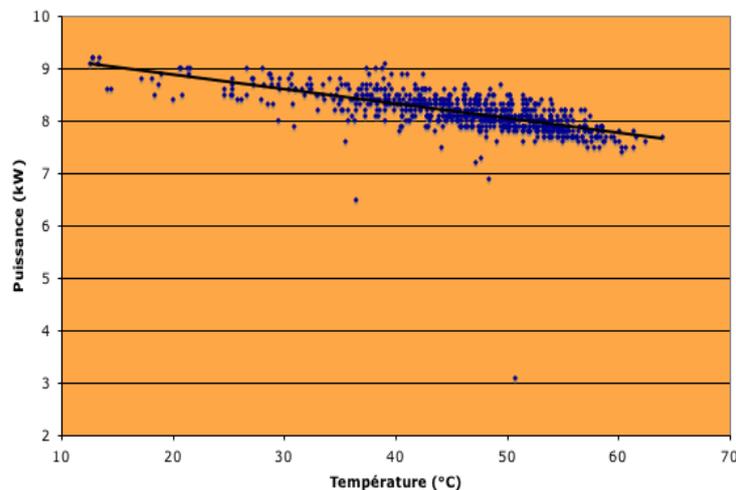


Figure 1- 3: L'Evolution de la Puissance Délivrée par un Ensemble de Modules PV en Fonction de la Température

1.2. L'énergie solaire thermique :

L'énergie solaire thermique est principalement utilisée pour la production d'eau chaude sanitaire et le chauffage d'habitations ou de piscines. Les capteurs solaires plans sont les éléments fondamentaux de la transformation de l'énergie solaire en énergie thermique.

Un capteur solaire classique, comme le montre le schéma suivant, est composé de plusieurs éléments :

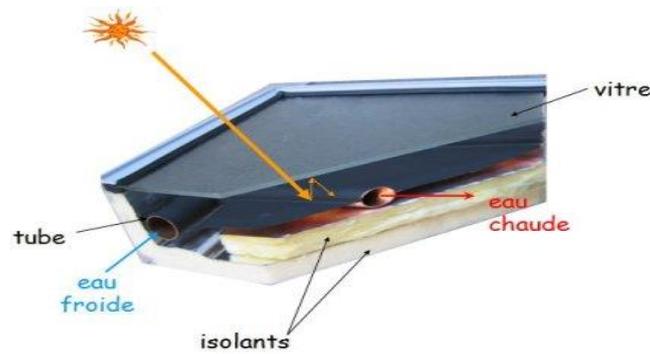


Figure I- 4: Capteur Solaire Classique.

- un corps opaque qui absorbe le rayonnement solaire en s'échauffant (l'absorbeur) ;
- une couverture transparente qui assure l'effet de serre et évite le refroidissement de l'absorbeur en le protégeant du vent (pertes par convection avec l'air extérieur) ;
- un système de transfert de chaleur par le fluide caloporteur ;
- une isolation thermique arrière et latérale.

a. La surface Absorbante :

Le rôle de l'absorbeur est de capter au maximum le rayonnement solaire et d'en réémettre le moins possible. En effet, l'absorbeur, en chauffant, réémet des rayons infrarouges. Le revêtement de la surface est donc très important : il définit les caractéristiques de l'absorbeur qui sont l'absorption α du rayonnement solaire et l'émission ε des rayons IR. Une surface absorbante aura des performances optimum lorsque $\alpha = 1$ et $\varepsilon = 0$. De telles valeurs peuvent être obtenues grâce à un traitement de surface par des procédés électrochimiques ou électro physiques (traitement sous vide). A titre d'exemple, une peinture noire du commerce permet d'obtenir un coefficient d'absorption entre 0,9 et 0,95 mais avec un facteur d'émission IR très élevé (0,85) variable selon l'état de surface.

b. Couverture transparente :

Elle accroît sensiblement le rendement du capteur, par effet de serre. La couverture a une fonction de protection de l'absorbeur, mais elle joue aussi un rôle important dans le bilan thermique en réduisant les pertes de chaleur. Généralement, on utilise le verre comme couverture transparente.

La propriété physique intéressante du verre utilisé est qu'il laisse passer le rayonnement solaire de faible longueur d'onde (UV et visible) et qu'il réfléchit les rayons infrarouges d'une surface émettrice telle que l'absorbeur. La chaleur est donc bloquée entre l'absorbeur et la couverture : c'est l'effet de serre.

La qualité du verre est caractérisée par son rendement optique ou taux de transmission τ qui dépend de la nature et de l'épaisseur du vitrage.

c. Système de transfert de chaleur par le fluide :

Les tuyaux sont soudés sous l'absorbeur. A l'intérieur de ces tuyaux circule un fluide caloporteur (habituellement soit l'air ou l'eau ou un nano-fluide qui est le cas dans notre travail) de manière continue. Le fluide reçoit les calories de l'absorbeur à travers ces tuyaux.

Les nano-fluides se distinguent par les avantages suivants :

- ✓ l'amélioration du transfert de chaleur
- ✓ réduction de la taille de capteur
- ✓ refroidissement et lubrification parfaite

d. L'isolant :

Limiter les pertes thermiques vers l'extérieur est primordial pour optimiser les performances du capteur. Ainsi une couche de polystyrène ou de laine de verre réalise l'isolation en face arrière du dispositif.

1.3. Le couplage PVT (hybride) :

Le couplage des capteurs précédents permet d'optimiser l'utilisation de l'énergie solaire en disposant à la fois d'une source d'énergie électrique et d'une circulation d'un fluide caloporteur (eau ou air). Le principe consiste à allier un panneau PV à un système de chauffage thermique. L'échangeur de chaleur est placé sous le module PV pour évacuer la chaleur accumulée à l'arrière du module qui réduit la performance électrique de 0,4 à 0.5 % pour chaque degré Celsius au-dessus de sa température nominale qui est 25 °C. Donc pour maintenir le rendement nominal du module PV Il nous faut donc le refroidir.

Hicham Kaidouchi (Master soutenu en Juin 2014 au niveau du département de génie mécanique de l'Université du 8 Mai 1945 de Guelma) a étudié le refroidissement d'un capteur hybride PV/T à eau avec un seul canal de refroidissement placé sous le module PV. Sa surface est pratiquement la même que celle du capteur PV (Fig.1.5), permettant ainsi d'obtenir un meilleur refroidissement pour un capteur PVT, par contre, il a été remarqué que cette configuration n'est pas efficace pour un capteur PVT à air.

A cause de la faiblesse de conductivité thermique de l'air et du coefficient de transfert de chaleur, Mohamed Ould Sid Ahmed en master (Juin 2015), a étudié un capteur hybride PVT à air en y ajoutant des ailettes de refroidissement au canal. Le matériau étant des alliages d'aluminium récupéré des canettes de boissons, ce qui participe au développement durable.

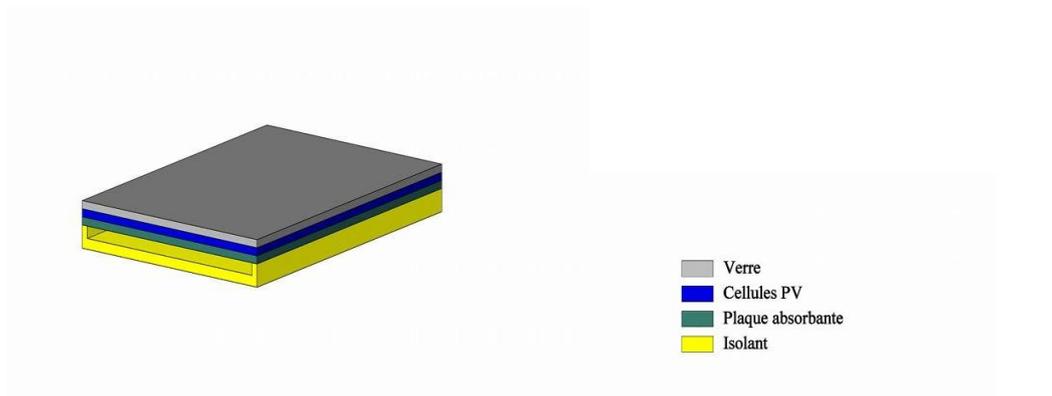


Figure 1- 5: La Configuration Etudiée par H.Kaidouchi (Master, Juin 2014, Université 8 Mai 1945 de Guelma)

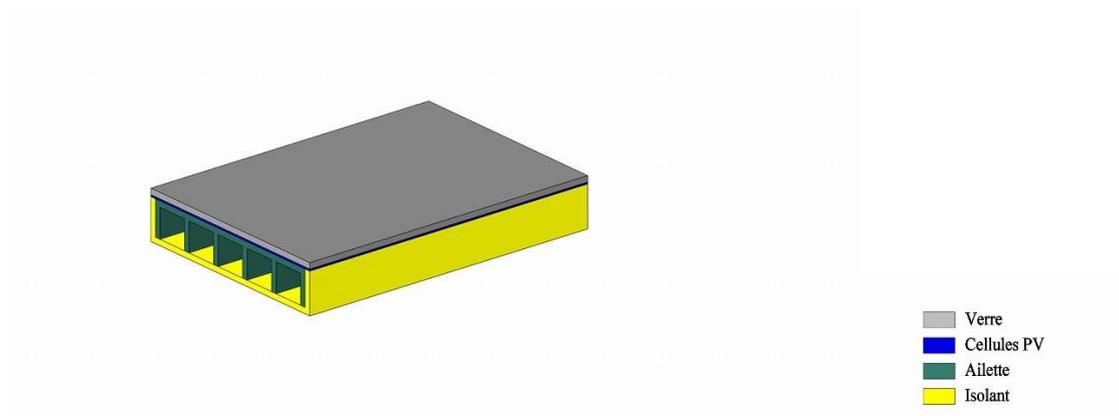


Figure 1- 6: La Configuration Etudiée par Mohammed Ould Sid Ahmed (Master Juin 2015- Université 8 Mai 1945 de Guelma)

1.4 Importance des panneaux PVT :

Les panneaux solaires présentent plusieurs avantages :

- d'un point de vue écologique, les panneaux solaires sont une énergie propre non polluante pour l'environnement. Aucun gaz à effet de serre n'est rejeté et il n'y a aucun déchet radioactif produit. (exemple en France 85.7 % de l'énergie provient du nucléaire, en Algérie 99.9% provient du pétrole)
- l'énergie solaire est inépuisable, contrairement aux énergies fossiles comme le carbone ou le pétrole qui sont pourtant encore plus utilisés que le solaire.
- Pour les endroits isolés ou les petites installations, rien de tel que les panneaux solaires pour les rendre autonomes
- Les panneaux solaires, une fois installés, demandent très peu d'entretien et l'énergie est produite sans action de l'homme
- De plus, les panneaux solaires ne sont encore que très peu utilisés et ont une forte marge d'évolution et un avenir prometteur

- Les panneaux solaires peuvent représenter un très bon investissement pour des particuliers
- Gain de l'espace inutile des toitures pour générer à la fois de l'électricité et avoir de l'eau chaude

Nous allons utiliser un nano-fluide pour le refroidissement du capteur PVT

Faizal *et al.* [10] ont étudié les performances thermiques des capteurs solaires nano-fluide et sa contribution de réduction de la taille pour estimer la réduction des coûts. Leurs résultats indiquent que le rendement du collecteur solaire avec nano-fluides est calculé en fonction de la densité du fluide de travail, de la chaleur spécifique et débits massiques. Les résultats ont confirmé que la densité plus la élevée et la chaleur spécifique la plus faible de nano-fluides offre une rendement thermique supérieure à celle de l'eau et peuvent réduire la surface de capteurs solaires environ 25,6%, 21,6%, 22,1% et 21,5% pour CuO, SiO₂, TiO₂ et Al₂O₃ nano-fluides comme on le voit dans *la figure 8*. Par conséquent, il permettra de réduire le poids, l'énergie et le coût de fabrication du collecteur. La valeur moyenne de 220 MJ incarné énergie peut être économisée pour chaque collecteur, la période de récupération peut atteindre 2,4 ans, les émissions de CO₂ d'environ moins de 170 kg sera le résultat de l'utilisation collecteur solaire a base de nano-fluide par rapport à un système conventionnel. Coût de dommages à l'environnement est également plus faible avec collecteur solaire a base de nano-fluide.

Le nano-fluide est composé de nanoparticules et de fluide de base et un tensioactif le rôle de chaque un des composants est :

a-Rôle des nanoparticules :

Gan et al a montré expérimentalement que l'absorption de rayonnement de nano-fluides Al₂O₃ est inférieure à nano-fluides Aluminium. Pour nano-fluides avec des particules Al₂O₃, la situation est différente en raison des propriétés optiques différentes d'Al₂O₃. La faible absorption de rayonnement de nanoparticules Al₂O₃ ne donnera pas lieu à un transfert de chaleur importante localisée par convection de nano particules vers le fluide de base. L'utilisation de Al₂O₃ nano-fluide / eau en tant que liquide de refroidissement a été simulée pour une cellule solaire au silicium en utilisant la méthode des éléments finis par Elmer et al. Ils ont considéré le panneau solaire comme une cavité inclinée avec une pente de 30°. Application de nano-fluides augmente le nombre de Nusselt moyen et le taux de refroidissement. Ils ont rapporté 27% amélioration du taux de transfert de chaleur pour 10% d'alumine nano-fluide à Re = 5.

Luo et al. [8] simuler la performance d'un capteur solaire avec nano-fluides DAC utilisant un modèle 2D en résolvant les équations de transport radiatives des milieux particulaires et la combinaison des équations de transfert de chaleur par conduction et convection. Le nano-fluide écoule horizontalement de droite à gauche dans un capteur solaire à l'état stable recouverte d'une plaque de verre. Un simulateur de rayonnement solaire est utilisé pour valider leur modèle. Ils ont préparé en dispersant nano-fluides oscillants et TiO₂, Al₂O₃, Ag, Cu, SiO₂, des nanoparticules de graphite, et de nanotubes de carbone dans l'huile Texatherm. Leurs résultats montrent que l'utilisation du capteur solaire en nano-fluide peut améliorer le rendement et la température de sortie. Ils ont également constaté que l'efficacité de la plupart des nano-fluides sont similaires et plus grande que celle de l'huile, à l'exception de TiO.

Rahman et al.[9] effectué une étude numérique pour un capteur solaire de forme triangulaire avec nano-fluides par la méthode des éléments finis résiduelle pondérée de Galerkin pour une large gamme de nombre de Grashof (Gr). Le fond ondulé est maintenu à une température élevée constante et les parois latérales de l'enceinte triangulaire sont conservées à basse température comme on le voit sur *la figure 7*. On suppose que les deux phases liquide et des nanoparticules sont en équilibre thermique et il n'y a pas de glissement entre eux. Le Nano-fluides est newtonien et incompressible, et le flux est laminaire et instable. Les propriétés thermo physiques constantes sont prises en compte pour le nano-fluide à l'exception de la variation de densité dans les forces de flottabilité déterminées en utilisant l'approximation de Boussinesq. Néanmoins, les diamètres des particules ne sont pas mentionnés. Les auteurs concluent que la valeur de Gr et la fraction volumique de solide explique un meilleur transfert de chaleur par convection et conduction. Les résultats ont montré une amélioration de 24,28% pour $Gr = 106$ à 10% de fraction de volume de particules de cuivre. Pour les valeurs inférieures de nombre Gr , la conduction est le principal mode de transfert de chaleur pour toute valeur de fractions de volume solides. Les résultats ont montré que les performances de transfert de chaleur par convection est meilleur quand la fraction volumique du solide est maintenu à 0,05 ou 0,08. Cette étude a également montré que nano-fluide Cu dans l'eau est le meilleur nano-fluide pour l'augmentation du transfert de chaleur.

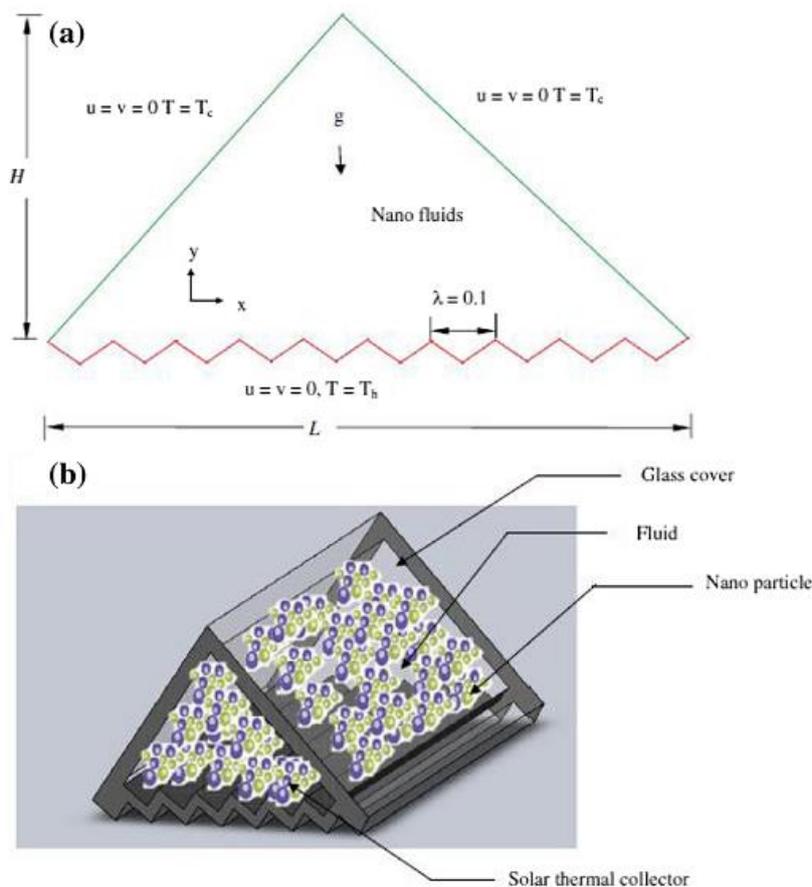


Figure 1- 7: (A) Schéma du collecteur de forme triangulaire (b) vue en 3D d'un capteur solaire thermique rempli de nanofluide [9].

Faizal *et al.* [10] ont étudié les performances thermiques des capteurs solaires nano-fluide et sa contribution de réduction de la taille pour estimer la réduction des coûts. Leurs résultats

indiquent que le rendement du collecteur solaire avec nano-fluides est calculé en fonction de la densité du fluide de travail, de la chaleur spécifique et débits massiques. Les résultats ont confirmé que la densité plus la élevée et la chaleur spécifique la plus faible de nano-fluides offre une rendement thermique supérieure à celle de l'eau et peuvent réduire la surface de capteurs solaires environ 25,6%, 21,6%, 22,1% et 21,5% pour CuO, SiO₂, TiO₂ et Al₂O₃ nano-fluides comme on le voit dans *la figure 8*. Par conséquent, il permettra de réduire le poids, l'énergie et le coût de fabrication du collecteur. La valeur moyenne de 220 MJ incarné énergie peut être économisée pour chaque collecteur, la période de récupération peut atteindre 2-4 ans, les émissions de CO₂ d'environ moins de 170 kg sera le résultat de l'utilisation collecteur solaire à base de nano-fluide par rapport à un système conventionnel. Le coût des dommages à l'environnement est également plus faible avec collecteur solaire à base de nano-fluide.

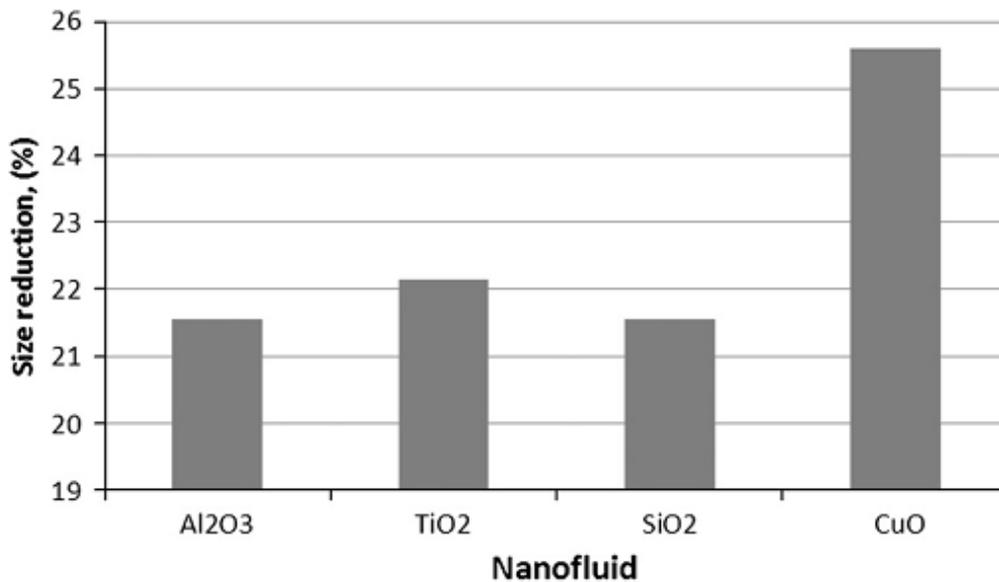


Figure 1- 8: Pourcentage de réduction de la taille de capteur solaire en appliquant différent nano-fluides.

Parvin *et al.* [11] ont étudié numériquement les effets de la fraction volumique de nanoparticules ($\phi = 0\%$, 1%, 3%, 5% et 7%) et le nombre de Reynolds ($Re = 200, 400, 600, 800$ et 1000) sur la distribution de la température, le taux de production d'entropie, et le rendement du collecteur. Le fluide de travail est un nano-fluide incompressible Cu-eau sous un régime laminaire. Leurs résultats ont été les suivants :

- L'augmentation de la concentration des particules augmente la viscosité du fluide et diminue le nombre de Reynolds et diminue par conséquent le transfert de chaleur.
- Il est important de trouver la fraction volumique optimale de nanoparticules pour chaque application.
- Le rendement du capteur peut être amélioré près de deux fois à l'aide nano-fluide eau-Ag et eau-Cu eau avec une concentration de 3% comme on le voit sur *la figure 3*
- La production d'entropie est améliorée jusqu'à $\phi = 3\%$ comme on le voit sur *la figure 9*. Après ce niveau, en ajoutant plus de nanoparticules ne fait aucun changement dans la production d'entropie moyenne.

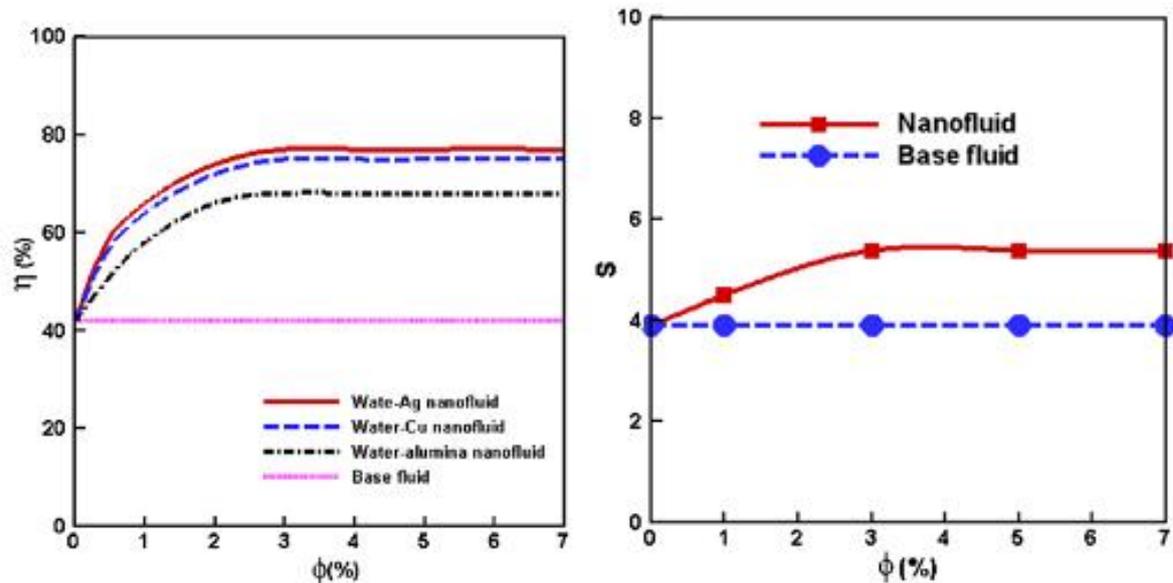


Figure 1- 9: Rendement de Collecteur (η), la production d'entropie moyenne (S) et le nombre Bejan (Be) à différentes concentrations.

Ladjevardi *et al.* [12] ont étudié numériquement les effets de l'utilisation des nano-fluides sur la performance d'un capteur solaire comme on le voit sur *la figure 10* en tenant compte des différents diamètres et fractions volumique des nanoparticules de graphite. Ils ont observé que dans le domaine infrarouge, les caractéristiques optiques de l'eau sont dominantes alors que dans les gammes UV et visible des coefficients d'extinction sont dépendantes de fractions volumiques des nanoparticules. Coefficient d'extinction est calculé à partir du rendement d'absorption et de diffusion dans cette recherche. Leurs résultats numériques ont montré que le rendement thermique du collecteur a base de nano-fluide augmente d'environ 88% par rapport à celui de collecteur d'eau pure à la température d'entrée de 313 K. Il peut également être augmenté jusqu'à 227% avec une température d'entrée de 333 K.

Filho *et al.* [13] ont étudié des nanoparticules d'argent en tant qu'absorbants de lumière du soleil directe pour les applications solaires thermiques. Leur résultats ont montré que le maximum en énergie thermique stockée augmente de 52%, 93% et 144% pour une concentration de 1,62, 3,25 et 6,5 ppm, respectivement, des particules d'argent en raison des bonnes propriétés photo-thermique de conversion de nanoparticules d'argent. Ils ont également observé que l'influence de la concentration de particules sur le taux d'absorption spécifique (TAS) est seulement perceptible à la période initiale de chauffage. Il a été conclu que la réduction de le TAS à des charges plus élevées de particules (65 et 650 ppm) pourrait être le résultat de :

- la formation d'agglomérats et à la réduction de l'intensité de la lumière solaire dans le fluide en raison des particules déposées sur la surface,
- La différence dans l'efficacité d'absorption de chaque particule à différentes profondeurs de fluide,
- La fuite de chaleur par rayonnement peut devenir renforcée par la concentration des particules est supérieure à une valeur déterminée comme on le voit sur les figures 19,20 et 21.

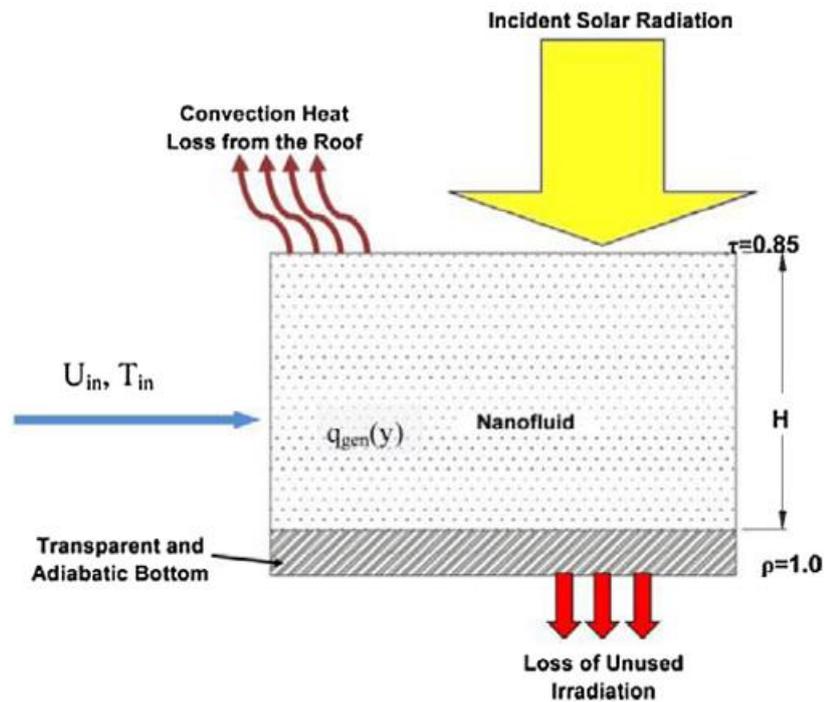
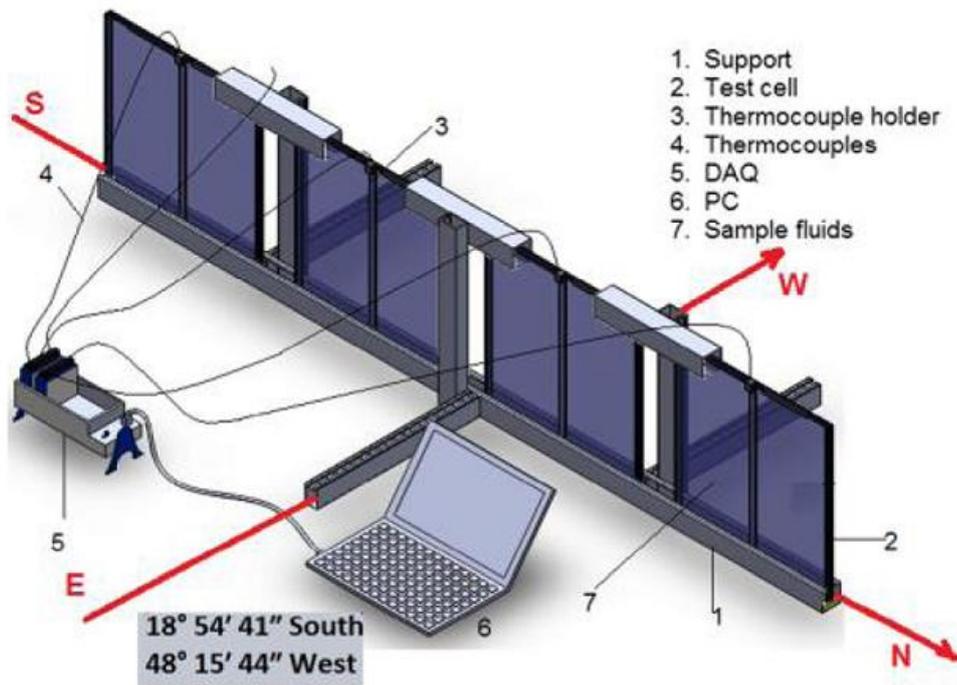


Figure 1- 10: Schéma du capteur solaire volumétrique.

Karamé *et al.* [14] expérimentalement démontré que les alcalines qui sont des suspensions aqueuses à base de carbone nanotubes (f-CNT), de 10-nm de diamètre et de 5 à 10 mm de longueur, a une bonne stabilité en tant que fluide absorbeur de basse température dans des collecteur solaire absorption directe (CSAD). La raison est liée à la nature hydrophile de carboxylate. f-CNT qui réduit considérablement le facteur de transmission et augmente la conductivité thermique comme on le voit sur *la figure 14*. Ils ont recommandé l'utilisation de ce type de nanofluide pour absorber la lumière directement. Dans cette étude, le f -NTC a été dispersé dans de l'eau par un instrument à ultrasons avec des fractions volumiques inférieures à 150 ppm. Des concentrations plus élevées ont produit une solution noire où la lumière n'a pas été en mesure de passer à travers elle.



(a)



(b)

Figure 1- 11: Système Expérimental : (a) une Représentation Schématique et (b) une Capture du Système sous Lumière Directe du Soleil au-dessus d'un Toit.

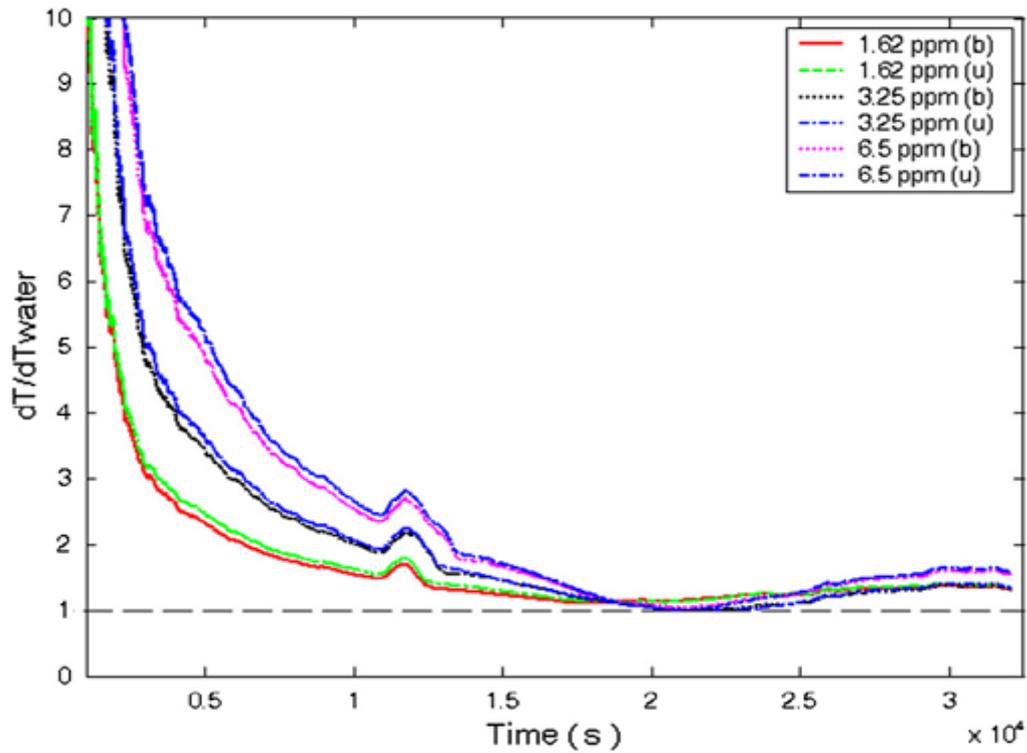


Figure 1- 12: Comparaison du Rapport de l'Energie Thermique Stockée à Différentes Concentrations (où b et u se Réfèrent à des Thermocouples Situés dans le bas et des Positions en haut, Respectivement).

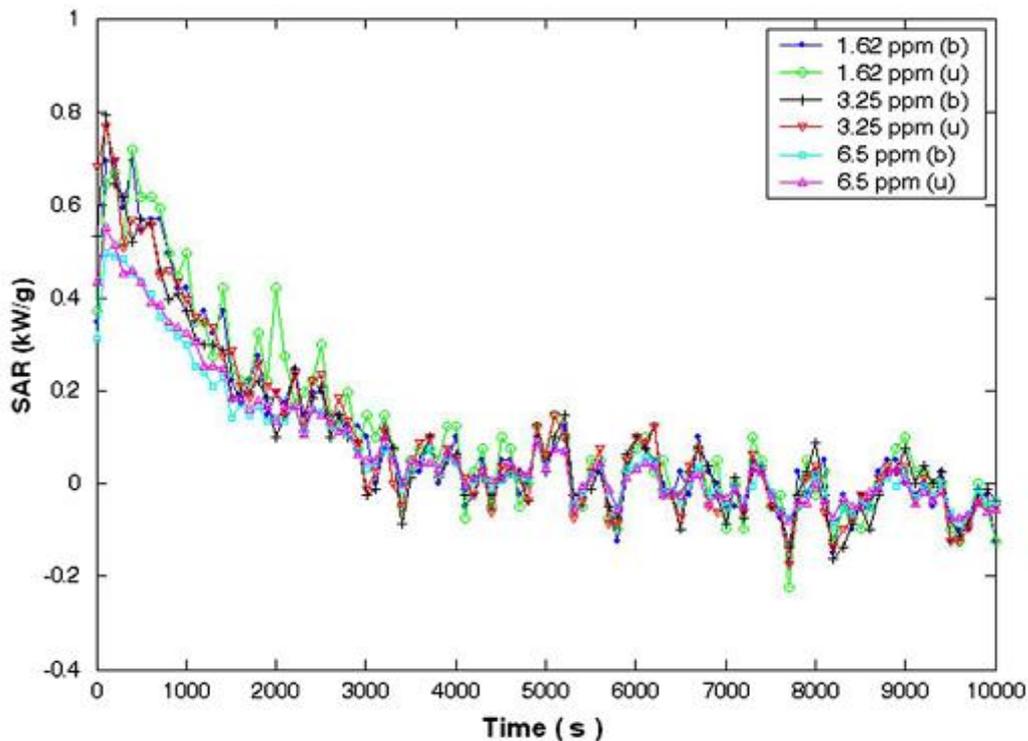


Figure 1- 13: Taux d'Absorption Spécifique des Nanoparticules d'Argent (où b et u se Réfèrent à des Thermocouples Situés dans le bas et des Positions Supérieure Respectivement).

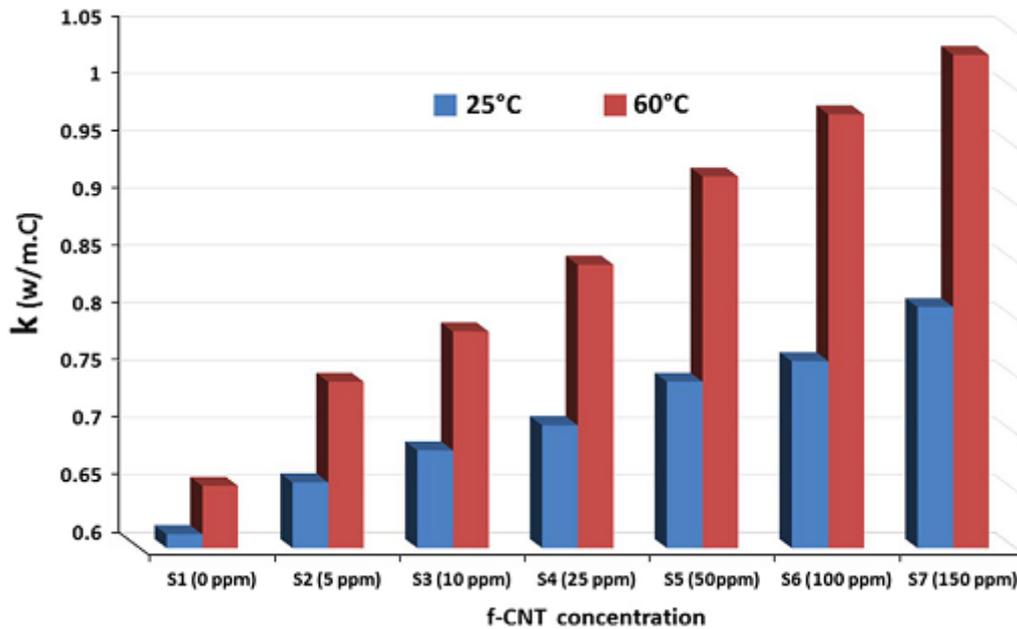


Figure I- 14: Conductivité Thermique du Nano-fluide f-CNT / eau à la Température Ambiante et à 60 ° C.

Said *et al.* [15] ont constaté que les nano-fluides avec des nanotubes de carbone à paroi simple (PSCNT) dans un collecteur solaire de plaque plane, augmentent la génération d'entropie minimale par rapport aux nano-fluides préparées en suspendant Al_2O_3 , TiO_2 et des nanoparticules de SiO_2 dans le même fluide de base comme on le voit sur *la figure 15*. Ils ont attribué la diminution de la production d'entropie à l'augmentation des flux de chaleur sur la plaque d'absorption due à l'ajout de nanoparticules. Un Appareil à ultrasons et un homogénéiseur à haute pression (capacité de jusqu'à 2000 bar) est utilisé pour disperser les nanoparticules dans l'eau. Il a observé que les PSCNT nano-fluides pourrait réduire la production d'entropie de 4,34% et d'accroître le coefficient de transfert thermique par 15,33%. Il y avait aussi une petite pénalité à la puissance de pompage de 1,2%.

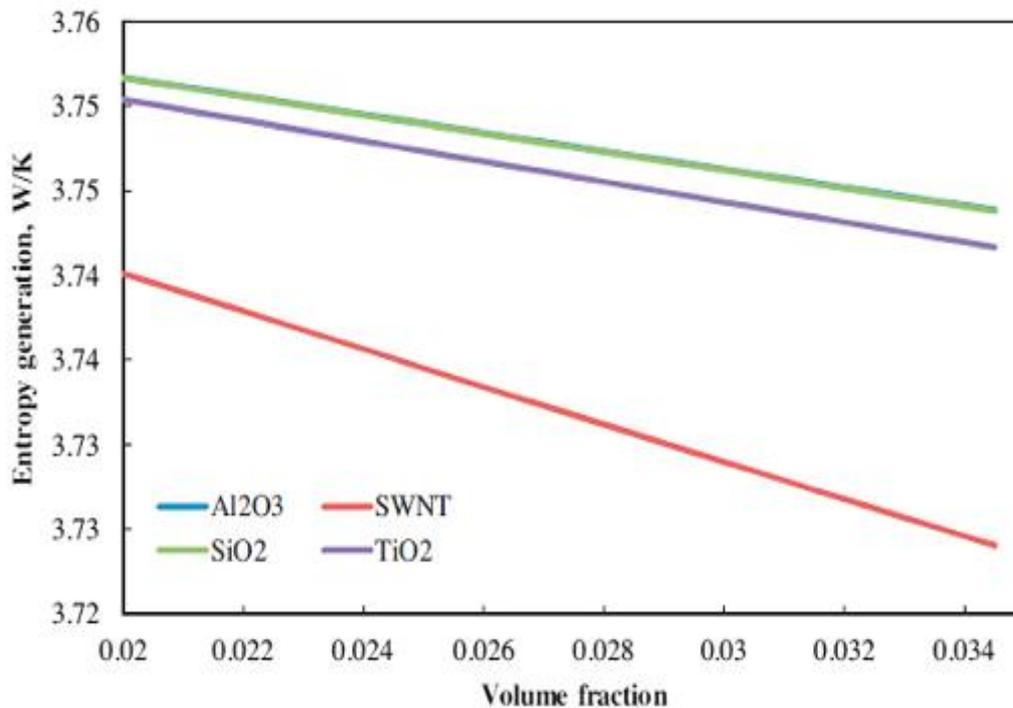


Figure 1- 15: Changement de la Génération d'Entropie avec la Fraction Volumique.

Tang *et al.* [16] ont préparé le nanotube de carbone de composites PEG / SiO₂ ayant une conductivité thermique élevée à partir de nanotubes de carbone à parois multiples (PMCNT), (le polyéthylène glycol) (PEG) et SiO₂ inorganique. Ces composites ont une conductivité thermique supérieure à celle des matériaux à changement de phase (MCP) traditionnels en raison de la conductivité thermique élevée de PMCNTs. Leurs résultats ont montré clairement que les composites PEG / SiO₂ / de MWCNT peuvent effectivement améliorer le rendement des applications de l'énergie solaire.

Saidur *et al.* [17] ont étudié les effets de différents paramètres sur le rendement à basse température d'un capteur solaire absorption directe(CAD) à base de nano-fluide (des nanoparticules d'aluminium et de l'eau). Un grand avantage de l'utilisation de systèmes à basse température est que les capteurs solaires peuvent être relativement simples et peu coûteux. En outre, il existe un certain nombre de fluides de travail appropriés pour un fonctionnement à basse température. Les liquides de base qui sont couramment utilisés sont l'eau, l'huile et l'éthylène glycol. Ils représentaient les effets de l'absorption et de la diffusion au sein du nano-fluide pour évaluer l'intensité de la répartition au sein du nano-fluide par l'équation de transfert radiatif (ETR). Pour calculer le coefficient d'extinction spectrale du nano-fluide qui est la somme du coefficient de diffusion et le coefficient d'absorption, ils ont étudié les propriétés optiques du fluide de base et des nanoparticules séparément. Leurs résultats ont révélé que le nano-fluide aluminium / eau avec une fraction volumique de 1% améliore considérablement l'absorption solaire. Ils ont constaté que l'effet de la taille des particules sur les propriétés optiques du nano-fluide est minime, mais dans le but d'avoir une diffusion de Rayleigh la taille des nanoparticules doit être inférieure à 20 nm. Ils ont également constaté que le coefficient d'extinction est linéairement proportionnel à la fraction volumique.

Sokhan Sefat *et al.* [18] ont étudié numériquement l'amélioration de transfert de chaleur pour un nano-fluide Al₂O₃ /huile synthétique avec des concentrations allant jusqu'à 5% dans un tube

creux de collecteur parabolique à différentes températures de fonctionnement comme on le voit sur *la figure 16*. Le nano-fluide améliore le coefficient transfert thermique par convection comme on peut le voir sur *la figure 17*.

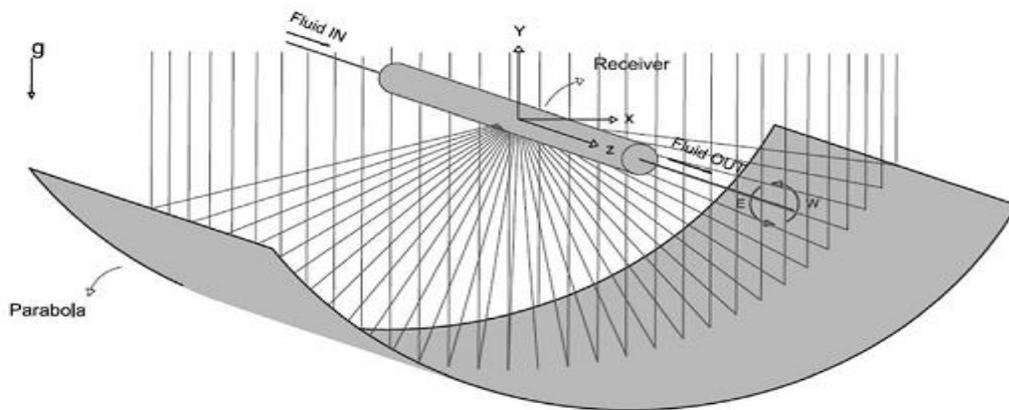


Figure 1- 16: Schéma du Cylindro-Parabolique et un Tube Absorbeur.

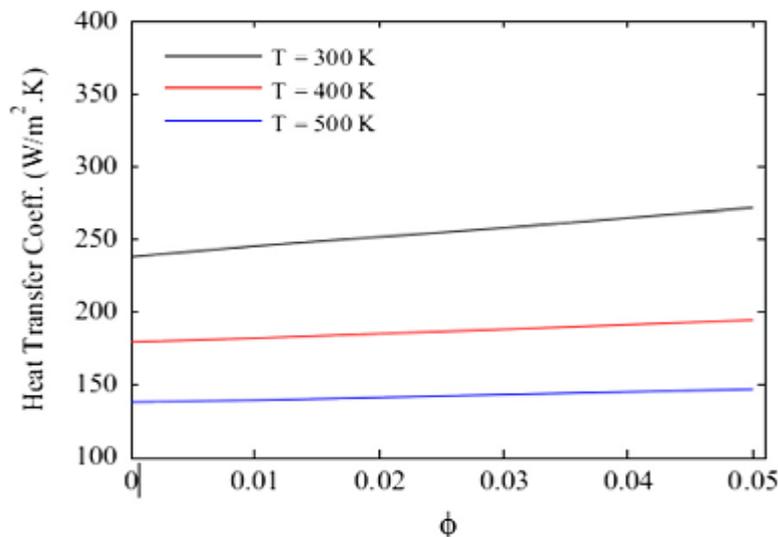


Figure 1- 17: Coefficient moyen de transfert de chaleur par convection en fonction de la concentration des particules à des températures de fonctionnement 300, 400, et 500K.

Nasrin *et al.* [19] ont effectué une étude numérique pour étudier l'influence du nombre de Prandtl sur la circulation, les champs de température, Le taux de transfert par convection et rayonnement, la température moyenne apparente des fluides et le champ de vitesse moyen dans un capteur solaire à base de nano-fluide eau/ Al_2O_3 comme on le voit sur *la figure 18*. Les résultats ont montré qu'avec l'augmentation de nombre de Pr 1.73 à 6.62, le transfert de chaleur par convection augmente d'environ 26% et 18% pour nano-fluide et le fluide de base respectivement, tandis que le rayonnement augmente de 8%.

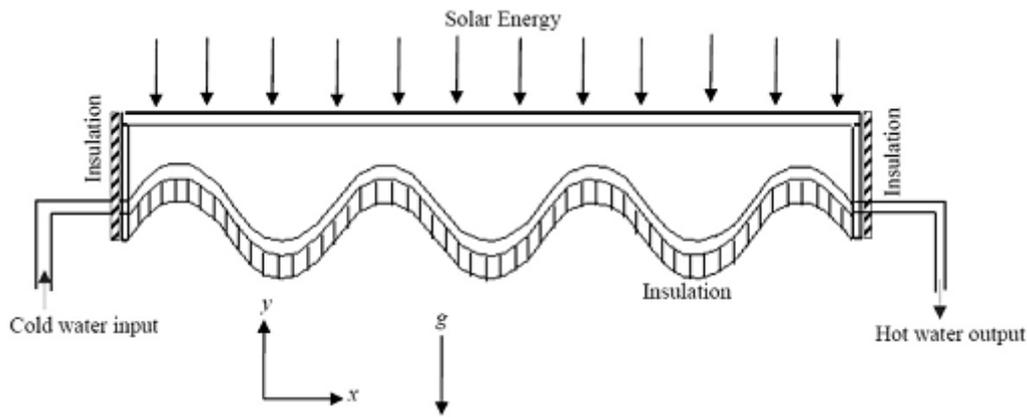


Figure 1- 18: Schéma de principe du capteur solaire.

b-Rôle de fluide de base :

Colangelo *et al.* [20] ont montré par voie expérimentale que l'amélioration de la conductivité thermique des nano-fluides avec de l'huile diathermique est supérieure à celle de l'eau dans des applications à haute température telles que des capteurs solaires. Ils ont observé que la conductivité thermique diminue avec l'augmentation de la taille des nanoparticules.

Hardy *et al.* [21] ont fabriqué quatre nano-fluides différents en dispersant des nanotubes de carbone à parois multiples (PMCNT) dans les fluides caloporteurs qui sont l'eau, l'éthylène glycol, le propylène glycol et THERMINOL VP-1 à l'aide d'un bain à ultrasons. Ils ont examiné à la fois le long terme et la stabilité à haute température des nano-fluides CNT pour une utilisation dans l'absorption solaire directe. Dans ce travail l'utilisation du plasma est appliquée pour modifier la surface des PMCNT et pour améliorer leur propriété de dispersion dans le fluide de base. Cette étude fait état d'une démonstration quantitative de la température élevée et la stabilité à long terme de nano-fluides éthylène glycol et le propylène glycol à base MWCNT pour capteurs solaires thermiques.

Said *et al.* [22] ont étudié expérimentalement la conductivité thermique, la viscosité et la chute de pression d'eau, l'éthylène glycol (EG), et la combinaison EG + H₂O (60:40) à base de Al₂O₃ (13 nm). Les nano-fluides sont préparés en utilisant la méthode de dispersion par ultrasons dans la plage de température de fonctionnement de 25 °C à 80 °C et à des faibles gammes de concentrations de 0,05% à 0,1 %. Ils ont observé que la déviation des valeurs expérimentales des valeurs estimées de la conductivité thermique des nano-fluides Al₂O₃ / eau est très élevée, mais les valeurs expérimentales des nano-fluides Al₂O₃ / EG sont presque identiques à ceux du modèle de calcul comme on le voit dans la figure 19. Leurs résultats ont montré que la chute de pression de nano-fluides circulant dans un collecteur solaire à faible concentration est légèrement supérieure à celle du fluide de base.

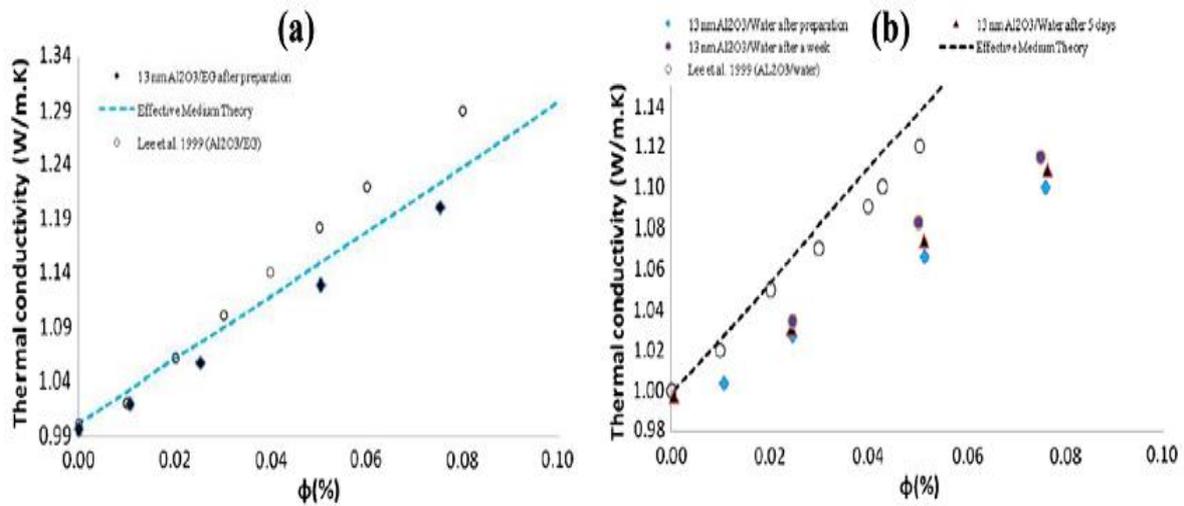


Figure 1- 19: Conductivité thermique nano-fluides : (a) Al₂O₃ / EG et (b) Al₂O₃/ eau à différentes fractions volumiques et à 25 ° C

c-Rôle de tensioactifs (surfactants) :

Singh *et al.* [25] ont remarqué que la sélection de tensioactif a un rôle important dans la préparation des nano-fluides stables. Le choix d'un bon agent tensioactif dépend principalement des propriétés des fluides et des particules de base. Par exemple, des nanoparticules d'oxyde de silicium ont été dispersées avec succès dans TH66 en utilisant du chlorure de Benzalkonium (BAC, Acros Organics) en tant qu'agent tensioactif, mais l'utilisation de BAC agent tensio-actif avec des nanoparticules de Cu n'a pas fourni une stabilité suffisante de la suspension en raison de l'absence d'une interaction spécifique entre les nanoparticules et les molécules tensioactives. L'agencement bicouches de molécules tensioactives doit fournir une bonne adhérence à la surface de nanoparticules et la miscibilité avec le solvant aromatique. Dans ce travail, les auteurs ont utilisé une combinaison d'acide oléique et un mélange de Octadécyle Thiol (ODT) et tensioactifs BAC pour disperser des nanoparticules de Cu dans les fluides TH66 et TH59, respectivement. Ils ont observé les agglomérats 3D des nanoparticules de Cu ne se dissout pas par sonication classique, mais avec des pistolets ultrasons sans température d'affinage. Ils ont montré que le temps de sonication d'environ 4 heures conduit à la rupture efficace des agglomérats de Cu dans les grains individuels à 120 ° C. Ils ont également conclu que nano-fluide Cu/TH66 semblent être plus stables que les nano-fluide Cu / TH59 en raison de la viscosité dynamique plus élevée.

Yousefi *et al.* [26,27] ont étudié expérimentalement l'effet de nano-fluide d'Al₂O₃ (15 nm) et MWCNT (10-30 nm) / l'eau sur le rendement d'un capteur solaire à une plaque plane. Les fractions en masse des nanoparticules ont été de 0,2% et 0,4%, et les expériences ont été réalisées avec et sans Triton X-100 comme agent tensio-actif. Leurs résultats ont montré que la présence de surfactant dans les nano-fluide affecte extrêmement le rendement du capteur solaire.

Lehnert *et al.* [28] ont présenté un modèle combiné et une étude expérimentale pour optimiser les performances d'un récepteur volumétrique cylindrique par nano-fluide. Ils ont conclu que le rendement est supérieure à 35% lors de récepteurs volumétriques à nano-fluide couplés à un cycle d'alimentation et optimisés par rapport à l'épaisseur optique et le temps d'exposition

au soleil. Cette étude fournit une perspective importante dans l'utilisation des nano-fluides comme récepteurs volumétriques dans les applications solaires à concentration. Dans ce travail, des nanoparticules de 28 nm de cobalt recouvert de carbone (C-Co) sont dispersées et suspendu dans Therminol VP-1 après 30 minutes dans un bain d'ultrasons sans tensioactif.

2-1- Introduction :

Les propriétés thermo-physiques (la masse volumique, la chaleur spécifique, l'expansion thermique, la viscosité dynamique et la conductivité thermique) des solutions sont profondément modifiées par l'ajout des nanoparticules.

De nombreux paramètres caractérisant ces nanoparticules peuvent avoir un effet notable sur les valeurs des paramètres thermo-physiques du nano-fluide obtenus (la nature des nanoparticules, leur taille, leur formes, la fraction volumique ϕ , la conductivité du fluide de base et celle des nanoparticules, la température du milieu, etc.). De nombreuses recherches théoriques et expérimentales ont été menées, lors de ces deux dernières décennies, en vue de mieux caractériser les propriétés physiques des nano-fluides mais cette caractérisation est encore loin d'être satisfaisante. On supposera dans toute la suite de notre travail que les nanoparticules sont bien dispersées dans le fluide de base et qu'ils sont en état d'équilibre thermique avec ce dernier.

2-2- Les propriétés thermo-physiques effectives du nano-fluide :

Les propriétés thermo-physiques effectives du nano-fluide seront approximées par différentes relations tirées de la littérature que nous établirons dans la suite de ce travail.

a- La Masse volumique :

Pour calculer la masse volumique d'un nano-fluide que nous supposerons parfaitement homogène (bonne dispersion des nanoparticules dans le fluide) en fonction de la fraction volumique ϕ à une température T donnée, nous revenons à la définition de la masse volumique de ce mélange.

$$\rho_{nf} = \left(\frac{m}{V}\right)_{nf} = \frac{m_f + m_s}{V_f + V_s} = \frac{\rho_f V_f + \rho_s V_s}{V_f + V_s} \quad (2.1)$$

La fraction volumique des nanoparticules, notée ϕ désigne le rapport du volume des nanoparticules sur le volume total (fluide + solide).

$$\phi = \frac{\text{Volume slide}}{\text{Volume totale du nanofluide}} = \frac{V_s}{V_s + V_f} \quad (2.2)$$

On en déduit alors la masse volumique du nano-fluide :

Où ρ_{nf} : La masse volumique du nano-fluide,

ρ_f : La masse volumique du fluide de base

ρ_s : La masse volumique des nanoparticules solides

Remarque : Dans tous les travaux, sans exception, les nano-fluides ont été caractérisés en fonction de la fraction volumique notée $\phi = \frac{V_s}{V_T}$ or ce paramètre dépend de la température T du nano-fluide au moment du mélange, même si on suppose que le volume des particules solides varie peu pour de faibles variations de température, celui des fluides par contre varie et les expériences des uns et des autres pour réaliser le nano-fluide avec un ϕ donné ont été conduites à des températures différentes. Il aurait mieux valu pour mener à bien ces études prendre un

autre paramètre indépendant de la température, c'est le cas de la fraction massique $C = \frac{m_s}{m_T}$ une fois ce rapport utilisé, C reste constante égale à C_0 dans un milieu homogène et ce pour toute valeur de T si l'on ne prend pas en compte la thermo diffusion.

b- La chaleur spécifique :

La chaleur spécifique est la capacité calorifique par unité de masse d'une substance ou d'un système homogène $C_p = dQ/mdT$. La chaleur spécifique correspond à l'apport de chaleur nécessaire pour élever la température de l'unité de substance de 1 K lors de la transformation considérée. Pour la détermination de la chaleur spécifique d'un nano-fluide, on a retrouvé suivant les auteurs l'une ou l'autre des deux relations suivantes.

De nombreux auteurs dont Park et Cho [27] ont utilisé:

$$(c_p)_{nf} = (1 - \varphi)(c_p)_f + \varphi(c_p)_s \quad (2.3)$$

Certains auteurs dont Xuan et Roetzel [28] ont utilisé:

$$(\rho c_p)_{nf} = (1 - \varphi)(\rho c_p)_f + \varphi(\rho c_p)_s \quad (2.4)$$

$$\begin{aligned} (\rho C_p)_{nf} &= (\rho)_{nf}(c_p)_{nf} = \rho_{nf} \frac{Q_f + Q_s}{(m_f + m_s)\Delta T} \\ &= \rho_{nf} \frac{(mC_p)_f \Delta T + (mC_p)_s \Delta T}{(m_f + m_s)\Delta T} = \rho_{nf} \frac{(\rho V C_p)_f + (\rho V C_p)_s}{\rho_f V_f + \rho_s V_s} \\ &= \left(\frac{\rho_f V_f + \rho_s V_s}{V_f + V_s} \right) \left(\frac{(\rho V C_p)_f + (\rho V C_p)_s}{\rho_f V_f + \rho_s V_s} \right) = (\rho)_f (C_p)_f \frac{V_f}{V_f + V_s} + (\rho)_s (C_p)_s \frac{V_s}{V_f + V_s} \end{aligned}$$

d'où :

$(C_p)_{nf}$, $(C_p)_f$ et $(C_p)_s$ désignent respectivement les chaleurs spécifiques du nano-fluide, du fluide de base et des nanoparticules.

Nous présentons sur les figures de (2.1) à (2.5) les valeurs du rapport $(C_p)_{nf} / (C_p)_f$ obtenus à partir des deux relations (2.3) et (2.4) pour différents nano-fluides avec comme fluide porteur l'eau et pour différentes nanoparticules (Al_2O_3 , CuO , Cu , Ag et Au) en fonction de la fraction volumique φ variant de 0 à 8%. On relève une différence notable entre les valeurs calculées à partir des deux relations de chaleur spécifique (2.3) et (2.4).

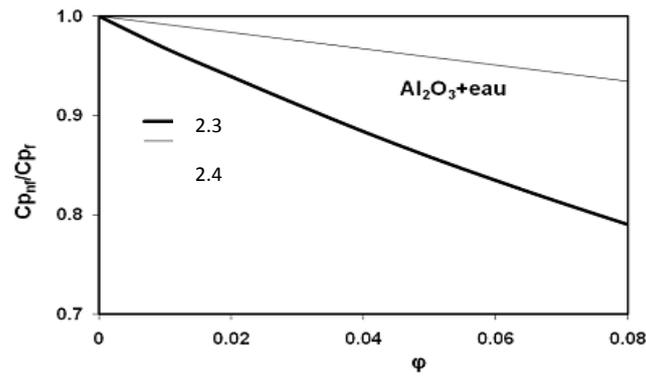


Figure 2- 1: Valeur De $(Cp)_{Nf}/(Cp)_F$ En Fonction De Φ Pour Le Nano-Fluide (Al_2O_3+eau) Obtenues A Partir Des Deux Relations Donnant La Chaleur Spécifique Du Nano-Fluide.

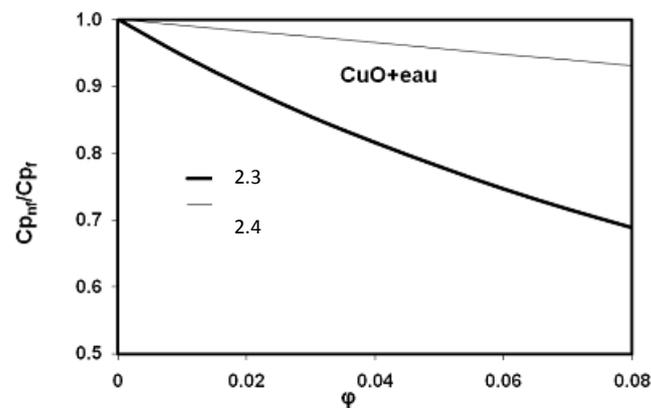


Figure 2- 2: Valeur De $(Cp)_{Nf}/(Cp)_F$ En Fonction De Φ Pour Le Nano-Fluide $(CuO+eau)$

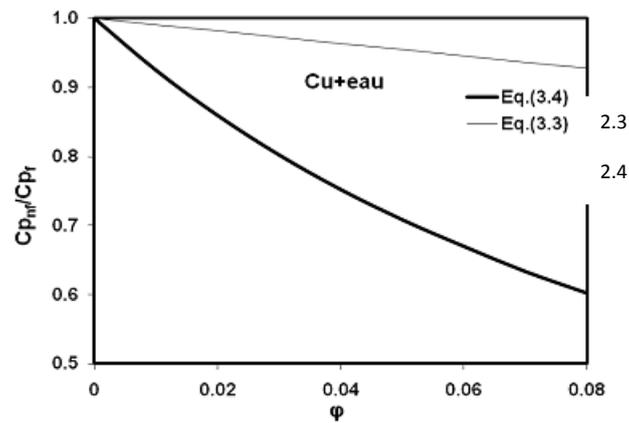


Figure 2- 3: Valeur De $(Cp)_{Nf}/(Cp)_F$ En Fonction De Φ Pour Le Nano-Fluide $(Cu+eau)$

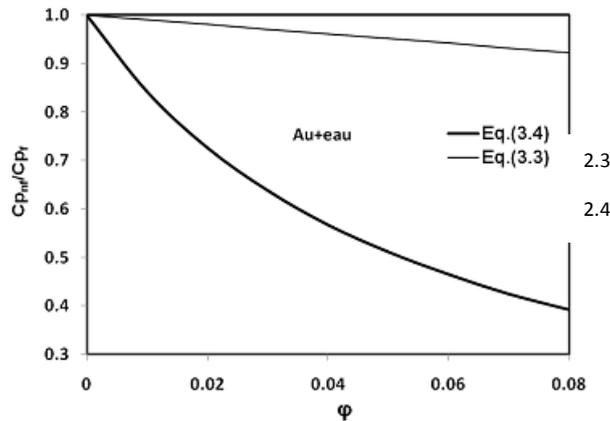


Figure 2- 4: Valeur De $(C_p)_{Nf}/(C_p)_F$ En Fonction De Φ Pour Le Nano-Fluide (Au+Eau)

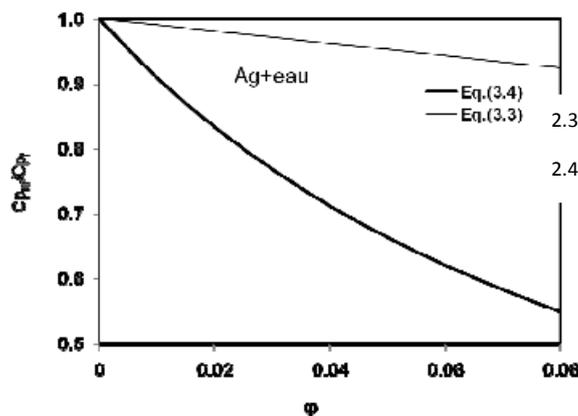


Figure 2- 5: Valeur De $(C_p)_{Nf}/(C_p)_F$ En Fonction De Φ Pour Le Nano-Fluide (Ag+Eau)

c- Coefficient d'expansion thermique :

Nous nous intéressons dans le cadre de notre étude aux seuls fluides porteurs incompressibles (masse volumique indépendante de la pression) mais dilatables. Cette variation de masse volumique sous l'action de la température est caractérisée par le coefficient d'expansion thermique : $\beta_T = -\frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial \rho}{\partial T} \right)_p$ appelé également coefficient de dilatabilité. Pour calculer la valeur de ce coefficient pour les nano-fluides de très nombreux auteurs ont utilisé à la suite des premiers travaux sur les nano-fluides, par analogie avec la relation suivante :

$$\rho_{nf} = (1 - \varphi)\rho_f + \varphi\rho_s \quad (2-5)$$

On déduit l'expression suivante :

$$\beta_{nf} = (1 - \varphi)\beta_f + \varphi\beta_s \quad (2-6)$$

Où β_f et β_s désignent respectivement les coefficients de dilatabilité du fluide porteur et celle des nanoparticules.

Kim *et al.* ont supposé que le coefficient d'expansion thermique du fluide (β_f) est largement plus grand que celui des nanoparticules solides (β_s). Il ramène l'équation précédente (2-5) se réduit à la forme simplifiée suivante :

$$\beta_{nf} = (1 - \varphi)\beta_f \quad (2-7)$$

En supposant que l'on affaire à des fluides porteurs incompressibles, les nanoparticules et la différence de température imposée aux nanoparticules restent modérée pour écrire que la masse volumique du nano-fluide et de ses constituants s'exprime sous une forme linéaire de la température par :

$$\rho_{nf} = \rho_{0nf} (1 - \beta_{nf}(T - T_0)), \rho_f = \rho_{0f} (1 - \beta_f(T - T_0)), \quad (2-8)$$

$$\rho_s = \rho_{0s} (1 - \beta_s(T - T_0)) \quad (2-9)$$

De la première équation, on en déduit l'expression de :

$$\beta_{nf} = - \frac{(\rho_{nf} - \rho_{0,nf})}{\rho_{0,nf}(T - T_0)}$$

En remplaçant ρ_{nf} et $\rho_{0,nf}$ par leur valeur tirée de l'équation (2-5) on en déduit :

$$\beta_{nf}\rho_{0,nf} = (1 - \varphi)\beta_f\rho_{0,f} + \varphi\beta_s\rho_{0,s}$$

Si on néglige la dilatabilité des nanoparticules devant celle du fluide porteur on est conduit à la relation simplifiée suivante :

$$\beta_{nf}\rho_{0,nf} = (1 - \varphi)\beta_f\rho_{0,f} \quad (2-10)$$

d- La viscosité dynamique :

La majorité des études qui ont traité de la viscosité des nano-fluides ont eu recours, pour son calcul à partir de la viscosité du fluide de base et de la fraction volumique ϕ , aux relations de Stokes-Einstein ou de Brinkman. Ces relations ont été établies dans un cadre précis à savoir particules métalliques de forme sphérique, en faible concentration, parfaitement dispersées et sans interaction inter-particules. Or les nanoparticules utilisées dans les différentes expérimentations ne sont ni sphériques ni de même taille, en particulier lorsqu'il s'agit de nano-fluides avec des nanotubes de carbone. L'ajout de particules solides dans un liquide provoque une augmentation, plus ou moins importante, de la viscosité du mélange obtenu. Là encore, de nombreux facteurs peuvent être à l'origine des disparités constatées. Pour des nanoparticules identiques (nature, taille) et un même fluide de base, la qualité de la dispersion, et la température peuvent influencer considérablement sur la viscosité.

d-1-Les différents modèles de viscosités :

La viscosité dynamique d'un nano-fluide donné par Einstein [29] pour un mélange contenant des suspensions diluées de particules fines sphériques et rigides est la suivante :

$$\mu_{nf} = \mu_f(1 + 2.5\varphi) \quad (2-11)$$

μ_{nf} , μ_f désignent respectivement les viscosités dynamiques du nanofluide, du fluide de base et ϕ la fraction volumique des nanoparticules.

Cette relation n'est valable que pour $\phi < 0.03$. Par contre, Brinkman [30] a étendu la formule d'Einstein pour couvrir une large plage de concentrations volumiques.

$$\mu_{nf} = \frac{\mu_f}{(1 - \varphi)^{2.5}}$$

On remarque que pour les faibles fractions volumiques, la relation de Brinkman conduit exactement à celle d'Einstein. Ces relations n'intègrent pas les effets du mouvement Brownien ni ceux de la taille des particules. Pour ce qui est de la viscosité des nano-fluides, on conçoit que la prédominance des effets de surface sur les effets de volume, conjuguée aux effets de l'agitation thermique, rend caduques les modèles précédents.

Ainsi les travaux expérimentaux portant sur la mesure des viscosités des nano-fluides ont montré que cette dernière est plus élevée que celle tirée des relations précédentes.

e- Conductivité thermique des nano-fluides :

Une grande partie des travaux traitant des nano-fluides porte sur la quantification de l'augmentation de la conductivité thermique des nano-fluides. L'objectif de ces travaux est de mesurer cette conductivité thermique et de choisir les nanoparticules et le fluide porteur les plus appropriés pour obtenir des rapports conductivité thermique du nano-fluide sur celle du fluide porteur la plus élevée possible.

Les travaux ont également porté sur la façon de prédire cette augmentation de conductivité thermique en fonction de celle des nanoparticules et du fluide porteur ainsi que de celle de la taille et la forme de ces nanoparticules en proposant différentes relations donnant ce rapport des conductivités thermiques nano-fluide sur celle du fluide $\frac{k_{nf}}{k_f}$.

I-Méthodes de mesures de la conductivité thermique :

Différentes techniques de mesure de la conductivité thermique des nano-fluides ont été utilisées, la plus employée étant celle du fil chaud en régime transitoire. C'est uniquement sur cette dernière technique que nous reviendrons.

Méthode de fil chaud (le fil Platine) :

La technique du fil chaud en régime transitoire (en anglais THW : Transient Hot Wire method) a été utilisée couramment pour mesurer la conductivité thermique (k) des matériaux ; pour les liquides, en particulier, sa rapidité, sa facilité de mise en œuvre, et son coût peu élevé, en font la méthode de caractérisation la plus connue et la plus utilisée dans l'industrie

➤ Champs de température dans le fluide:

L'équation de la chaleur en coordonnées cylindriques dans le milieu extérieur qui pourrait être le nano-fluide est donnée par:

$$\frac{1}{\alpha} \frac{\partial T(r,t)}{\partial t} = \frac{\partial^2 T(r,t)}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T(r,t)}{\partial r} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial T(r,t)}{\partial r} \right) \quad (2-12)$$

Les conditions aux limites sont :

- 1- $\forall r \ t \leq 0, T(r, t) = T_0 = 0$
- 2- $\forall t \geq 0 \ r = 0, -k \left(r \frac{\partial T(r,t)}{\partial r} \right)_{r=0} = 0$
- 3- $r \rightarrow \infty, \forall t \leq 0, \text{Lim}(T(r, t) - T_0)_{r \rightarrow \infty} = 0$
- 4- $T(r, t = 0) = T_0$

La condition initiale est donnée par:

$$5- T(r, t = 0) = T_0$$

La solution de ce problème est donnée par :

$$T(r, t) - T_0 = \frac{q}{4\pi k} F\left(\frac{r^2}{4\alpha t}\right) \text{ avec } F\left(\frac{r^2}{4\alpha t}\right) = \int_{F\left(\frac{r^2}{4\alpha t}\right)}^{\infty} \frac{e^{-x}}{x} dx = \gamma - \ln\left(\frac{r^2}{4\alpha t}\right) + \frac{r^2}{4\alpha t} + O\left(\left(\frac{r^2}{4\alpha t}\right)^2\right) \quad (2-13)$$

avec $\gamma = 0.5772157$ (constante d'Euler) et la fonction F désigne la fonction Exponentielle intégrale notée habituellement Ei. Le groupement $r^2 / \alpha t$ désigne le nombre de Fourier. Pour un nombre de Fourier grand la solution de ce problème se ramène à:

$$\Delta T = T(r, t) - T_0 = \frac{q}{4\pi k} \left(\gamma - \ln\left(\frac{r^2}{4\alpha t}\right) \right) = \frac{q}{4\pi k} \ln(t) + \frac{q}{4\pi k} \ln\left(\frac{4\alpha}{r^2 e^\gamma}\right) \quad (2-14)$$

En traçant le graphe donnant $T(r, t) - T_0$ en fonction du logarithme de la température en un point du fluide (Cf. Figure 2-6), on en déduit la pente de la droite et connaissant cette pente on en déduit la valeur mesurée de la conductivité thermique :

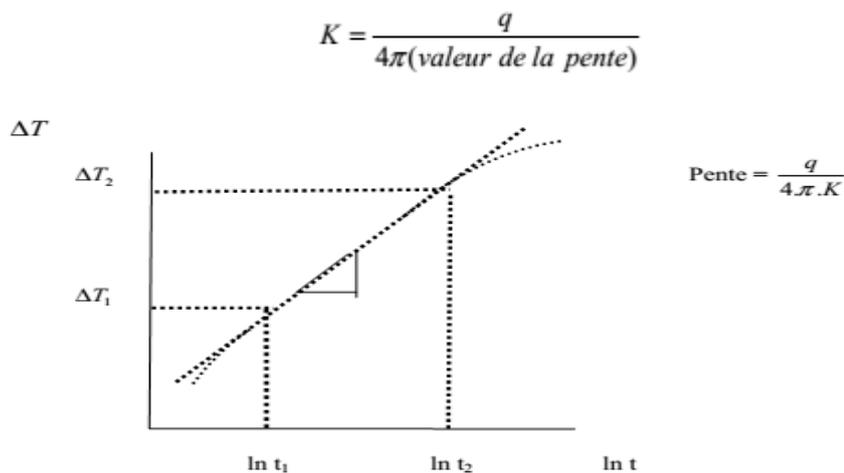


Figure 2- 6: Graphe Donnant $T(R, T) - T_0$ En Fonction Du Logarithme De La Température En Un Point Du Fluide

La génération de flux q dans le fil est donnée par :

$$q = \frac{I^2 R(t)}{l} \quad (2-15)$$

où $R(t)$ est la résistance électrique instantanée du fil (correspondant à une température $T(t)$ de fil), l est la longueur du fil et I est l'intensité du courant électrique en (A).

II- Modèles des conductivités thermiques :

A partir de la résolution de l'équation de l'énergie, beaucoup de modèles de calculs de la conductivité thermique ont été développés pour prédire l'estimation de la conductivité du nano-fluide, constitués par des éléments très réguliers tels que les nanoparticules sphériques, cylindriques, ellipsoïdes. Les modèles décrits dans la littérature sont des outils de prédictions

développés afin d'appréhender les mécanismes de transfert thermique aux seins des nano-fluides.

Il existe un panel important de modèles de calcul de la conductivité thermique apparente dans un nano-fluide. Notre objectif étant ici de présenter succinctement quelques-uns. Cette famille de modèles recouvre en réalité deux grands types d'approches d'une part l'analogie électrique, d'autre part par la résolution exacte de l'équation de la chaleur. Les modèles que nous présentons ne concernent que les nano-fluides. En dernier recours seule l'expérimentation physique permet d'obtenir une évaluation précise de la conductivité des nano-fluides.

Ces modèles concernent les milieux où l'empilement des particules est régulier. La phase solide est supposée discontinue, noyée dans une phase fluide continue. A partir de ce modèle, beaucoup de chercheurs ont développé plusieurs modèles qui s'appuient sur les mêmes principes que Maxwell

II-1-Modèle de Maxwell

Maxwell fait partie des chercheurs qui se sont intéressés au calcul de la conductivité thermique d'un fluide contenant des particules sphériques en suspension. Pour aboutir à l'estimation de cette dernière, il a supposé que le fluide renferme plusieurs particules sphériques de même diamètre D_p .

Les particules sont séparées d'une distance suffisante conduisant à l'absence d'interaction mutuelle entre elles, par conséquent le milieu est fortement dilaté (pas de contact entre les particules).

La formule de Maxwell est donnée par :

$$\frac{k_{nf}}{k_f} = \frac{k_s + 2k_f + 2(k_s - k_f)\phi}{k_s + 2k_f - (k_s - k_f)\phi} \quad (2-16)$$

k_{nf} , k_f , k_s désignent respectivement les conductivités thermiques du nano-fluide, du fluide de base et des particules solides.

II-2-Modèle de Hamilton-Crosser :

Le modèle de Hamilton [31] est une extension du modèle de Maxwell. Il concerne les particules de forme quelconque. Pour prendre en compte cette diversité de forme, Hamilton introduit un facteur géométrique appelé sphéricité (ψ) faisant référence à la géométrie sphérique. Ce coefficient est défini comme étant le rapport de la surface de la sphère ayant le même volume que les nanoparticules sur la surface d'une nanoparticule.

La conductivité thermique apparente du milieu est donnée par l'expression suivante :

$$k_{nf} = k_f \frac{\alpha + (n-1) - (n-1)(1-\alpha)\phi}{\alpha + (n-1) + \phi(1-\alpha)} \quad (2-18)$$

Avec $\alpha = \frac{k_p}{k_f}$ et n un facteur de forme empirique donné par :

$$n = \frac{3}{\psi} \quad (2-19)$$

$n = 3$ pour les particules sphériques et $n = 6$ pour les particules cylindriques. Pour $\psi = 1$ (particules sphériques) le modèle de Hamilton-Crosser est identique au modèle de Maxwell. Le modèle de Hamilton-Crosser est utilisée par Xuan et Li [32] pour obtenir une estimation de la

conductivité thermique en utilisant des différentes valeurs de ψ variant de 0.5 à 1.0, les résultats obtenus à partir de ce modèle pour $\psi = 0.7$ sont en bon accord avec les résultats expérimentaux. Par contre, Lee et al. [33] ont obtenu des valeurs de conductivité thermique des nano-fluides qui concordent avec les résultats expérimentaux en utilisant $\psi = 0.1$ pour le nano-fluide (Al_2O_3 +eau).

L'interface entre deux milieux constitue un obstacle au transfert de la chaleur. La résistance d'interface est un important facteur pour la détermination de la conductivité thermique des nano-fluides. Ce facteur, noté résistance de Kapitza (Rk) a été pris en compte par certains auteurs pour le calcul de cette conductivité thermique.

Hasselmann et Johnson [34] ont adapté le modèle de Maxwell en tenant compte de cette résistance:

$$\frac{k_{nf}}{k_f} = \frac{k_s(1+2\beta)+2k_f+2\varphi[k_s(1-\beta)-k_f]}{k_s(1+2\beta)+2k_f-\varphi[k_s(1-\beta)-k_f]} \quad (2-20)$$

avec : $\beta = \frac{2R_k K_f}{d}$

d : le diamètre moyen d'une nanoparticule

Rk : La résistance de Kapitza

K f : La conductivité thermique du fluide de base

D'après Wilson et al. [35], la résistance de Kapitza entre les nanoparticules et le fluide de base est égale à $7.7 \times 10^{-9} \text{ Km}^2 \text{ W}^{-1}$.

II-3-Modèle de Bruggeman :

Le modèle proposé par Bruggeman [36] semble mieux approximer certains résultats expérimentaux comparé aux autres modèles [31, 34] pour le cas des nanoparticules sphériques avec aucune limitation concernant les concentrations des nanoparticules.

$$k_{nf} = \frac{1}{4} [(3\varphi - 1)k_s + (2 - 3\varphi)k_f] + \frac{k_f}{4} \sqrt{\Delta} \quad (2-21)$$

$$\Delta = \left[(3\varphi - 1)^2 \left(\frac{k_s}{k_f} \right)^2 + (2 - 3\varphi)^2 + 2(2 + 9\varphi - 9\varphi^2) \left(\frac{k_s}{k_f} \right) \right] \quad (2-22)$$

Il est bien connu que les formules proposées par Maxwell et Hamilton-Crosser ne constituent qu'une première approximation de la conductivité thermique des nano-fluides. Pour cela, il existe plusieurs corrélations semi-empiriques basées sur des résultats expérimentaux utilisées pour calculer la conductivité thermique des différentes nano-fluides.

$$\frac{k_{nf}}{k_f} = 28.905 \varphi^2 + 2.8273\varphi + 1 \quad \text{Pour le nanofluide (EG + Al}_2\text{O}_3)$$

$$\frac{k_{nf}}{k_f} = -13\varphi^2 + 6.3\varphi + 1 \quad \text{Pour le nanofluide (Al}_2\text{O}_3 + \text{eau)}$$

$$\frac{k_{nf}}{k_f} = 11.6\varphi^2 + 9.6\varphi + 1 \quad \text{Pour le nanofluide (Cu + eau)}$$

$$\frac{k_{nf}}{k_f} = 7146\varphi^2 + 76.6\varphi + 1 \quad \text{Pour le nanofluide (huile + NTC)}$$

Comparaison entre la prédiction du modèle de H-C avec les résultats des autres modèles pour le nano-fluide (NTC + eau)

II-4- model de Fricke :

Fricke en 1924 a dérivée l'équation suivante pour déterminer la conductivité thermique d'une suspension à ellipsoïdes uniformément dispersées au hasard :

$$\lambda_{m.p} = \frac{\lambda_c \{x+k-xP_d(1-k)\}}{\lambda_c \{x+k+P_d(1-k)\}} \quad (2-23)$$

Où :

$\lambda_{m.p}$ Est la conductivité thermique prédite

P_d Est la fraction volumique des particules ellipsoïdales

$k = \frac{\lambda_d}{\lambda_c}$ C'est le rapport de la conductivité thermique,

λ_d Et λ_c est la conductivité thermique des particules suspendues

Et le fluide de base respectivement

x est une fonction du rapport de la conductivité thermique k et les paramètres a/b qui sont le rapport du rayon de l'axe de rotation à l'autre axe de l'ellipsoïde

L'équation de Fricke a été dérivée pour les ellipsoïdes de faible de la fraction volumique orientée au hasard. Une distribution aléatoire est approchée comme un état où 1/3 des particules ellipsoïdales sont attribuées à chacun des axes x , y et z . la conductivité thermique efficace est obtenue similaire à celui de l'équation de Maxwell. L'équation de Fricke utilise avec le paramètre x étant donné que :

$$x = \frac{\{(k-1)-k\beta\}}{\{(k-1)-\beta\}} \quad (2-24)$$

$$\beta = \frac{(k-\beta)}{3} \left\{ \frac{2}{1+(k-1)M/2} + \frac{1}{1+(k-1)(1-M)} \right\} \quad (2-25)$$

$$M = \left\{ \frac{\theta-(1/2) \sin 2\theta}{\sin^3 \theta} \right\} \cos \theta \quad (2-26)$$

$$\cos \theta = a/b$$

Si on considère que les dimensions **a** et **b** sont connus (on considérera dans notre cas les valeurs moyenne du rayon et de la longueur de la nanostructure du type nanotube ou nano fil par exemple), tu peux déterminer le coefficient $\cos\theta$, c'est-à-dire l'équation (14). Ensuite tu peux aussi calculer le paramètre **M** de l'équation (13). Cependant, il reste à déterminer l'équation (12) dans laquelle le paramètre β apparait. Une fois β connu, on déterminera le paramètre x grâce à l'équation (11). On calculera enfin la conductivité thermique effective $\lambda_{m,p}$ en utilisant l'équation (8) sachant que λ_c et λ_d représentent les conductivités thermiques de la phase continue (c'est-à-dire l'eau ou un autre fluide de base pour notre cas), et la conductivité de la nanostructure, respectivement (κ est connu car $\kappa=\lambda_d/\lambda_c$).

Il y a plusieurs facteurs qui affectent la conductivité thermique parmi eux

- 1- Effet de la fraction volumique des particules
- 2- Effet du matériau des nanoparticules
- 3- Effet de fluide de base
- 4- Effet de la taille des particules
- 5- Effet de la forme des particules
- 6- Effet de la température
- 7- Effet d'agglomération
- 8- Effet du Ph
- 9- Effet de la forme des particules

Il existe principalement deux formes de particules des nano-fluides utilisées dans la recherche ; les particules sphérique et cylindriques. Les particules cylindriques ont généralement une grande longueur par rapport au diamètre. La conductivité thermique du nano-fluides carbure de silicium / eau distillée et SiC / éthylène glycol ont été étudiées par Xie *et al.* (2002a) [38]. Deux types de nanoparticules ont été utilisées pour la préparation des nano-fluides; des particules sphériques de diamètre moyen de 26 nm et cylindrique de diamètre moyen de 600 nm. Il s'est avéré que le nano-fluide à base d'eau de 4,2% de particules sphériques en vol, possède une conductivité thermique de mise en valeur de 15,8%, tandis que le nano-fluide avec des particules cylindriques 4% vol avait une amélioration de conductivité thermique de 22,9%. L'Auteur a comparé les résultats avec le modèle Hamilton et Crosser (1962) [39]. Il a trouvé que le modèle de Hamilton et Crosser prédit très bien la conductivité thermique pour des particules cylindriques, alors qu'il sous-estime les valeurs associées à des nano-fluides avec des particules sphériques. Une autre étude a portée sur la forme des particules. Elle a été faite par Murshed *et al.* (2005) [40] (citée plus de 1000 fois dans la littérature). Ils ont mesuré la conductivité thermique du nano-fluide TiO₂ / eau dé-ionisée. Deux types de des nanoparticules sont utilisés : des particules sphériques (15 nm) et des particules en forme de tige (10 nm de diamètre et 40 nm, longueur). La stabilité et la dispersion de nanoparticules étaient améliorées en utilisant l'acide oléique et des tensioactifs CTAB. Pour le nano-fluides avec des particules sphériques, une amélioration maximale de 29,7% a été obtenue à 5 vol.%. Avec la même fraction volumique, des nanoparticules en forme de tige une amélioration de 32,8% est obtenue.

En plus de ces résultats expérimentaux, le fait que les nano-fluides avec des nanotubes de carbone (qui sont de forme cylindrique) présentent généralement une plus grande amélioration de la conductivité thermique que nano-fluides avec des particules sphériques doivent également être considérées. En conséquence, on peut conclure que les nanoparticules cylindriques permettent l'amélioration de la conductivité thermique plus élevée que les particules sphériques.

Une des raisons possibles peut être le transport rapide de la chaleur sur des distances relativement plus longues dans le cas des particules cylindriques (longueurs de l'ordre de micromètres). Toutefois, il convient de noter que nano-fluides avec des particules cylindriques ont en général des viscosités beaucoup plus grandes que celles avec des nanoparticules sphériques (Timofeeva *et al.*, 2009) [41]. Par conséquent, l'augmentation associée de la puissance de pompage est grande, ce qui réduit la possibilité d'utilisation des nano-fluides avec des particules cylindriques.

10- Effet de la taille des particules :

La taille des particules est un autre paramètre important de la conductivité thermique des nano-fluides. Il est possible de produire des nanoparticules de tailles différentes, généralement comprise entre 5 et 100 nm. Eastman *et al.* (2001) [42] ont étudié des nanoparticules de Cu, avec de l'éthylène glycol comme fluide de base. À l'aide d'un procédé de production en une seule étape, des suspensions de Cu nanoparticules inférieure à 10 nm ont été obtenues. Dans de l'acide Thio glycolique avec une concentration inférieure à 1% en vol, a été ajouté à certains des échantillons à des fins de stabilisation. Il a été mis en évidence qu'une meilleure amélioration est obtenue par rapport aux échantillons sans acide Thio glycolique. Une augmentation de 40% de la conductivité thermique a été observée à une fraction volumique de particules de 0,3% (avec l'acide Thio glycolique). Pour faire une comparaison, il convient de noter que dans l'étude de Lee *et al.* (1999) [43], les chercheurs ont obtenu 20% d'amélioration avec 4% vol de CuO (23,6 nm) / éthylène-glycol nano-fluide.

Il en résulte des améliorations obtenues qui sont assez anormales, Eastman *et al* [44]. Ont conclu que la taille des nanoparticules est un facteur important qui influe sur l'amélioration de la conductivité thermique, ce qui est contraire aux prévisions des modèles classiques tels que Hamilton et Crosser (1962) [39], (le modèle qui ne tient pas compte de l'effet de la granulométrie sur la conductivité thermique). Chopkar *et al.* (2006) [45] ont préparé un nano-fluide en dispersant les nanoparticules $Al_7O_3Cu_3$ en éthylène glycol. Nanoparticules ont été obtenues par mécano-synthèse. Par microscopie électronique à transmission, on illustre le fait qu'il n'y a pas de groupement significatif dans les échantillons. Le groupement varie suivant la taille des particules qui sont comprises entre 9 et 83 nm. Ils montrent que l'amélioration de la conductivité thermique diminue avec l'augmentation de la taille des particules. Pour des nano-fluides avec 0,5% vol., l'amélioration de la conductivité thermique diminuée de 38 à 3% lorsque la taille de particules augmente de 9 à 83 nm. Dans une autre étude, Chopkar *et al.* (2008) [46] ont étudié l'effet de la taille des particules sur la conductivité thermique des nano-fluides avec l'eau et l'éthylène glycol comme fluides de base, et Al_2Cu et Ag_2Al comme nanoparticules. Les tailles des nanoparticules varient entre 30 et 120 nm dans l'étude. Pour les quatre types des nano-fluides, on a observé que l'amélioration de la conductivité thermique augmente avec la diminution de la taille des particules.

Une autre étude de la dépendance systématique de la conductivité thermique des nano-fluides à la taille de particule a été faite par Beck *et al.* (2009) [47] pour les nano-fluides Al_2O_3 / eau et Al_2O_3 / éthylène glycol. La taille des particules varie entre 8 et 282 nm. L'HCl a été ajouté aux nano-fluides pour ajuster la valeur du pH à 4. Les mesures de conductivité ont été réalisées par un procédé à fil chaud transitoire à la température ambiante. Il a été observé que, pour la même fraction volumique des particules, la conductivité thermique diminue avec la diminution la taille des particules. Cet effet est plus prononcé pour des nano-fluides avec des particules inférieures

Chapitre II : Les Nano-fluides et leurs Propriétés Thermiques

à 50 nm. À la suite de ces résultats expérimentaux, il a été conclu que la diminution de la conductivité thermique existe lorsque les tailles des particules diminuent. Ces résultats ne sont pas en accord avec les études susmentionnées. Les résultats sont également en contradiction avec l'effet du mouvement Brownien, puisque avec le mouvement de l'effet Brownien, le libre parcours moyen diminue avec la taille des particules de plus en plus, ce qui diminue l'amélioration de la conductivité thermique associée. Mintsa *et al.* (2009) [48] ont mesuré la conductivité thermique de nano-fluides Al_2O_3 / eau. Deux tailles différentes des nanoparticules Al_2O_3 ont été utilisées dans l'expérience (36 et 47 nm). La fraction volumique des particules varie entre 0 et 18% et la température varie entre 20 et 50°C. On a observé que des améliorations de la conductivité thermique ont été à peu près les mêmes pour les deux particules à la température ambiante. Cependant, à des températures plus élevées, Al_2O_3 / le nano-fluide à base d'eau avec des particules plus petites montre une amélioration meilleure. Les résultats expérimentaux ont été comparés avec les modèles théoriques et il a été conclu que le modèle proposé par Chon *et al.* (2005) [49] arrive à prédire leurs données expérimentales.

La tendance générale dans les données expérimentales est que la conductivité thermique de nano-fluides augmente avec la diminution de taille des particules. Cette tendance est théoriquement prise en charge par deux mécanismes d'amélioration de la conductivité thermique; mouvement brownien de nanoparticules et stratification liquide autour des nanoparticules. Cependant, il existe aussi un grand nombre de données contradictoires dans la littérature indiquant que la conductivité thermique décroît avec la diminution de la taille des particules. En fait, pour le cas de nano-fluides avec des nanoparticules Al_2O_3 , de tels résultats sont plus fréquents que les résultats montrant l'augmentation de la conductivité thermique avec la diminution de la taille des particules. Les données associées pour Al_2O_3 nano-fluides / eau sont illustrés dans la Sect. 4.2. On pense que les données indiquant la diminution de la conductivité thermique avec une taille de particule décroissante peuvent être le résultat d'une classification sévère des nanoparticules dans les échantillons associés. Bien que le regroupement à un certain niveau puisse améliorer l'amélioration de la conductivité thermique, le regroupement excessif crée un effet inverse en raison de la sédimentation associée (Prasher *et al.* 2006) [50]. Feng *et al.* (2007) [51] ont montré que les effets de regroupement sont plus prononcés dans les échantillons de nano-fluides avec des particules plus petites. Cela peut expliquer les résultats dans lesquels les nano-fluides avec des particules plus petites montrent l'amélioration moins importante.

Tableau 2-1 des modèles pour l'estimation de la conductivité thermique de nano-fluides [37]

Modèles	Expression mathématique	Commentaires
---------	-------------------------	--------------

Chapitre II : Les Nano-fluides et leurs Propriétés Thermiques

Maxwell	$\frac{k_{eff}}{K_m} = 1 + \frac{3(\alpha - 1)v}{(\alpha + 2) - (\alpha - 1)v}$	Pour les particules sphériques
Hamilton Crosser	$\frac{K_{eff}}{k_m} = \frac{\alpha + (n - 1) - (n - 1)(1 - \alpha)v}{\alpha + (n - 1) - (1 - \alpha)v}$	Pour les particules cylindriques n=6 et sphériques n=3
Bruggeman	$k_{nf} = \frac{1}{4}[(3\phi - 1)k_s + (2 - 3\phi)k_f] + \frac{k_f}{4}\sqrt{\Delta}$	Pour les particules sphériques sans tenir compte de la concentration
Fricke	$\lambda_{m.p} = \frac{\lambda_c\{x + k - xP_d(1 - k)\}}{\lambda_c\{x + k + P_d(1 - k)\}}$	Pour les particules ellipsoïdales
Jeffery	$\frac{K_{eff}}{k_m} = 1 + 3\beta + (3\beta^2 + \frac{3\beta^2}{4} + \frac{9\beta^2(\alpha + 2)}{16(2\alpha + 3)} + \dots)v^2$	comprend deux interactions de particules sphériques

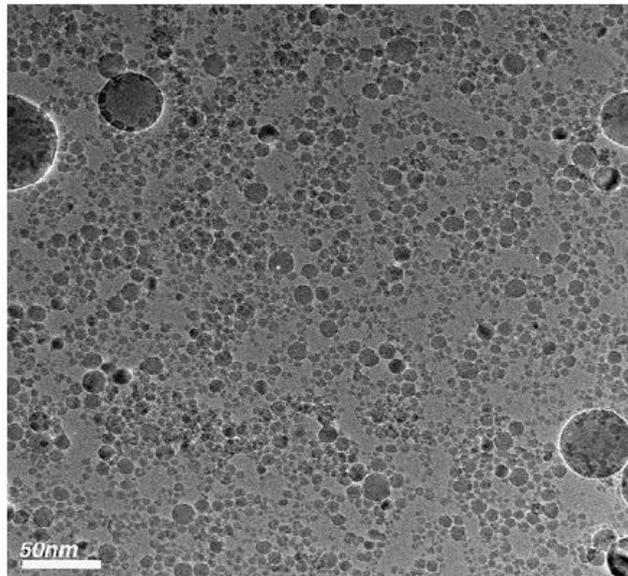


Figure 2- 7: Image Micrographique Par Met Des Nanoparticules De Al_2O_3 Dispersé Dans L'eau

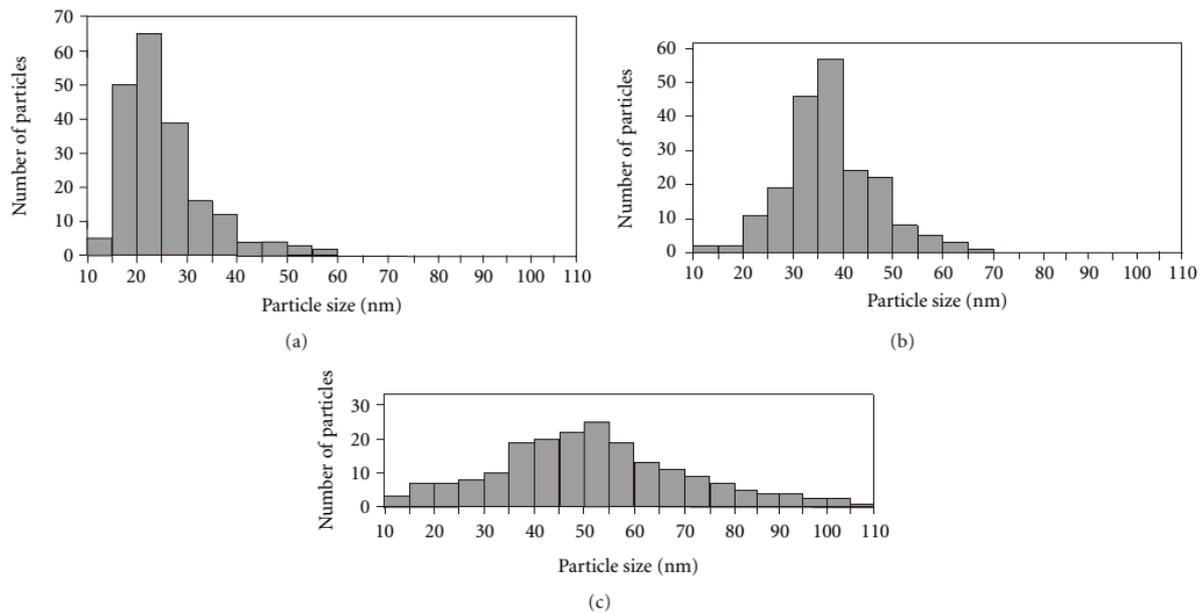


Figure 2- 8: Présentation De La Distribution De La Taille Des Nanoparticule D'Al₂O₃

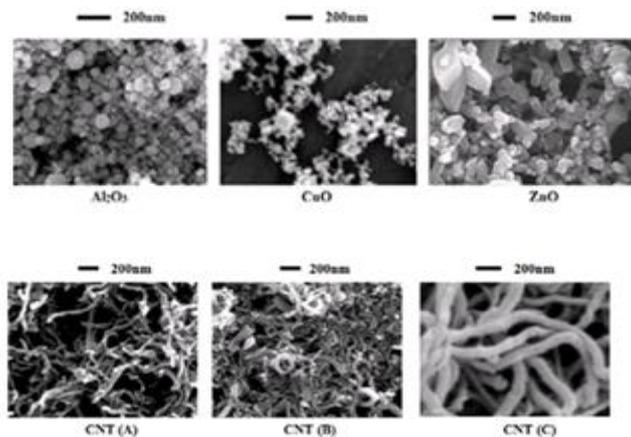


Figure 2- 9: Image MEB Des Nanoparticules Al₂O₃ Et CuO Et ZnO Et CNT

La figure 9 montre l'image MET des nanoparticules fournies par J.H. Lee *et al.* [52]. comme on peut le voir, en supposant Al₂O₃ avec des nanoparticules de formes sphériques que certains modèles se sont basés [31, 36] pour prédire la conductivité thermique effective du nano-fluide, s'éloigne de la réalité.

Selon l'image MET présentée dans la figure 7 et aussi d'autres images fournies par Premkumar et Geckeler [37], les nanoparticules Al₂O₃ ne sont pas complètement des particules de forme sphérique. Par conséquent, en utilisant $n_i = 3$ ne peut pas être acceptable. Du fait, leur forme est un peu loin de la sphère.

Xue a exprimé que dans le cas des particules de taille nanométrique, parce que les coquilles inter faciales existantes entre les nanoparticules et la matrice liquide, on peut considérer la

coquille inter faciale et la nanoparticule comme une nanoparticule complexe [9], Alors le système de nano-fluide doit être considéré comme un complexe des nanoparticules dispersées dans le fluide. En conclusion, la géométrie des nanoparticules la plus proche de la réalité doit être prise en compte.

Même constat pour la figure concernant les nanotubes de carbone, où on peut voir plusieurs formes et tailles.

D'après cet état de l'art des propriétés thermoϕysiques des nanoparticules, on remarquera que la même poudre contient plusieurs types de formes géométriques de nanostructures ainsi que des tailles différentes. Afin de pouvoir prédire la conductivité thermique avec précision plus ou moins acceptable, la mesure reste donc le meilleur moyen. Même constant en ce qui concerne la viscosité dynamique. A ce stade, pour ces deux dernières propriétés thermiques, on doit juste définir un intervalle avec une valeur maximale et minimale, la réalité se situera entre ces deux valeurs extrêmes. D'un autre côté, la masse volumique et la chaleur spécifique des nano-fluides ne posent pas de problème majeur : on arrive à les mesurer et les estimer avec une grande précision.

3-1. Introduction :

Le Soleil émet un rayonnement de type électromagnétique. La lumière blanche nous parvient en très peu de temps (elle met en moyenne environ 8 minutes et 19 secondes à nous parvenir) car elle se déplace à la vitesse de la lumière, soit 299 792 458 m/s. Ce rayonnement constitue un spectre continu allant des ultra-violet à l'infra-rouge en passant par le visible où il émet avec le maximum d'intensité. Cependant, en traversant la chromosphère du Soleil et l'atmosphère de la Terre, les atomes qui les composent absorbent certains photons. Le rayonnement solaire comprend : 5% d'ultra-violet, 40% de lumière visible et 55% d'infra-rouge, les IR étant porteurs de l'essentiel de l'énergie thermique.

3-2. Composition des rayons de soleil :

La lumière que nous voyons tous les jours ne représente qu'une fraction de l'énergie totale émise par le rayonnement incident du soleil sur la terre. La lumière du soleil est une forme de "rayonnement électromagnétique" et la lumière visible que nous voyons est un petit sous-ensemble du spectre électromagnétique comme le montre la figure ci-dessous.

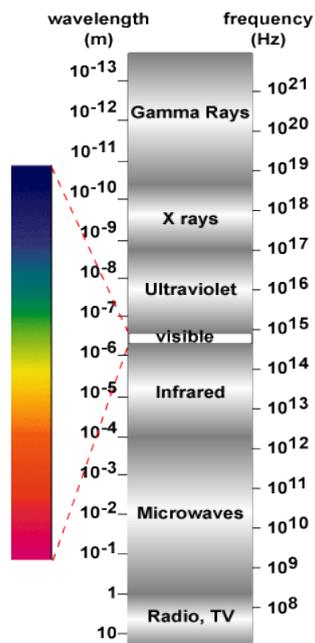


Figure 3- 1: Composition d'un spectre électromagnétique

Le spectre électromagnétique décrit la lumière comme une onde qui a une longueur d'onde particulière. Aujourd'hui, la mécanique quantique explique à la fois les observations de la nature ondulatoire et la nature corpusculaire de la lumière. En mécanique quantique, un photon, comme toutes les autres particules de la mécanique quantique comme les électrons, protons etc., est plus exactement la photo comme un "paquet d'onde". Un paquet d'ondes est défini comme une collection d'ondes qui peuvent interagir d'une manière telle que l'onde-paquet peut apparaître soit localisée spatialement (de la même façon comme une onde carrée qui résulte de l'addition d'un nombre infini d'ondes sinusoïdales), ou peuvent alternativement apparaître simplement comme une vague. Un paquet d'ondes, ou de photons est décrit comme utilisé dans PVCDROM ci-dessous.



Figure 3- 2: Paquet d'Onde

Une description physique complète des propriétés de la lumière nécessite une analyse de la mécanique quantique de la lumière, car la lumière est un type de mécanique quantique particule appelée photon.

Il existe plusieurs caractéristiques clés de l'énergie solaire incidente qui sont essentiels pour déterminer comment la lumière solaire incidente interagit avec un convertisseur photovoltaïque ou tout autre objet. Les caractéristiques importantes de l'énergie solaire incidente sont :

- le contenu spectral de la lumière incidente ;
- la densité de puissance du rayonnement du soleil ;
- l'angle sous lequel le rayonnement solaire incident frappe un module photovoltaïque ;
- l'énergie rayonnante du soleil tout au long de l'année ou à la journée pour une surface particulière.

Le rayonnement solaire est absorbé par l'eau, mais cette absorption n'est pas égale pour toutes les composantes de la lumière. Le rayonnement infrarouge est absorbé dans la pellicule de surface de l'eau et sa pénétration se réduit à quelques millimètres. Le rouge-orangé ne pénètre pas au-delà des 5 m de profondeur. Le vert disparaît entre 30 et 50 m. C'est le bleu qui est le moins absorbé, et on estime qu'en dessous de 60 m, la vision est monochrome dans le bleu. L'extinction du rayonnement solaire est totale vers 400 m de profondeur.[53]

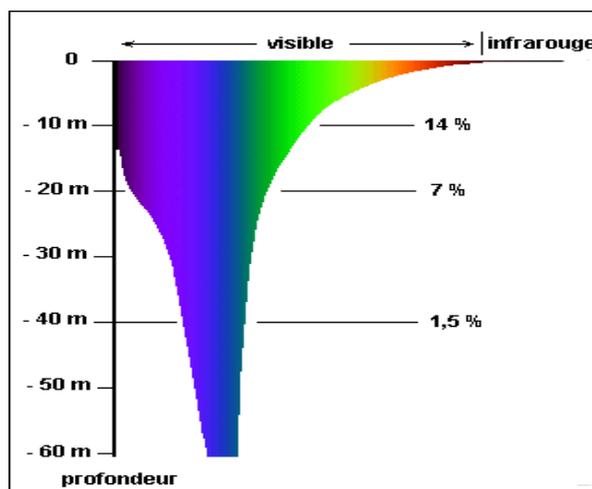


Figure 3- 3: Pénétration de la Lumières dans l'Eau

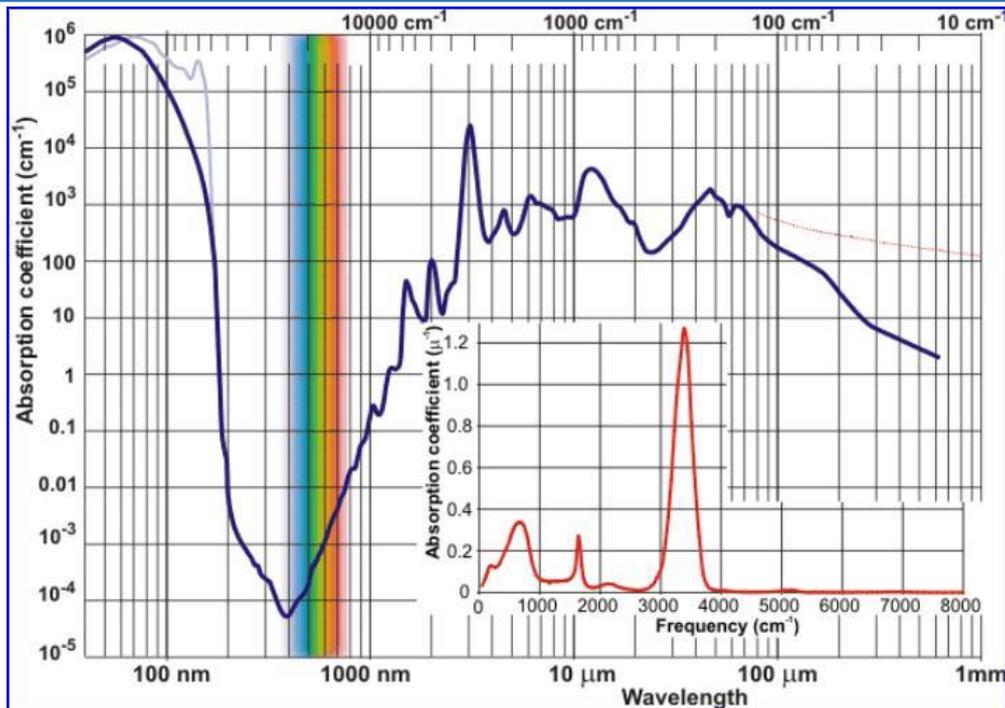


Figure 3- 4: Absorption de la lumière par l'eau

Pour qu'un électron de semi-conducteurs à se déplacer dans un circuit de charge externe, son niveau d'énergie doit être augmenté à son niveau de valence normale (étroitement lié à un atome) à son niveau de conduction d'énergie plus élevée (libre de se déplacer). La quantité d'énergie pour le stimuler au niveau supérieur est appelée énergie de "gap". Seuls les photons avec au moins l'énergie de gap pourront libérer des électrons pour créer un courant. Les photons de la lumière du soleil avec moins de l'énergie de gap vont tout simplement passer à travers la cellule solaire. En termes de rayonnement, tous les photons dans le spectre visible sont assez forts pour provoquer les électrons pour sauter la bande interdite. Certains infrarouge, tous les micro-ondes, et toutes les ondes radio ne disposent pas assez d'énergie et de passer à travers la cellule solaire. Dans la "distribution d'énergie de la lumière du soleil" la figure au-dessous, seule la moutarde de couleur photons peuvent être «absorbée» et créer de l'électricité dans une cellule de silicium cristallin. L'absorption du rayonnement électromagnétique est le processus par lequel l'énergie d'un photon du soleil est transformée en d'autres formes d'énergie, par exemple l'électricité ou de la chaleur. Les longueurs d'onde de couleur rouge n'ont pas assez d'énergie et les jaunes ont trop d'énergie. Les longueurs d'onde jaunes sont absorbés et produisent de l'électricité, mais beaucoup de leur énergie est perdue. C'est parce que les photons avec l'énergie de la bande interdite en excès génèrent un électron libre et un trou, mais leur énergie supplémentaire est dissipée sous forme de chaleur. Les rayons X et les rayons gamma ont tout simplement trop d'énergie pour être absorbé. La zone moutarde est essentiellement une image de la limite SQ comme calculées en 1961 par Shockley et Queisser appliquée au silicium.

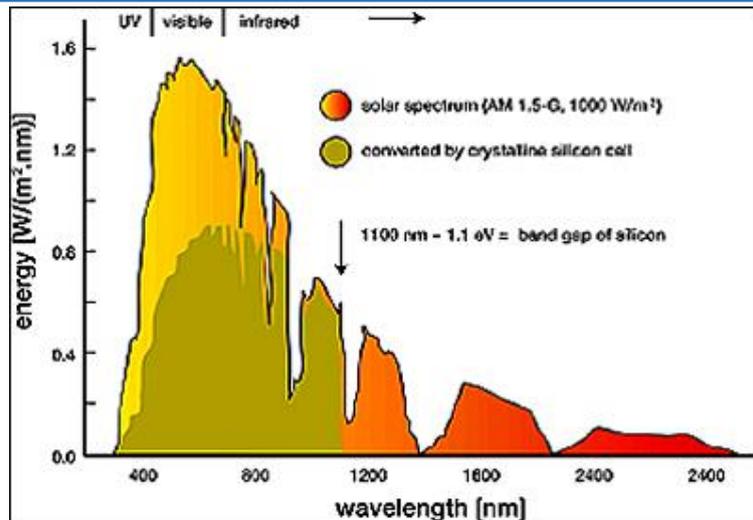


Figure 3- 5 : Absorption de la lumière par les cellules de silicium

Durant la conversion photovoltaïque du capteur solaire, une chaleur est générée ce qui augmentera la température de la cellule photovoltaïque et causera une chute de son rendement. Cet échauffement a été considéré comme néfaste pour le rendement des capteurs solaires photovoltaïques. Grâce aux propriétés d'absorption de l'eau des rayons de soleil qui laisse passer juste la partie efficace du rayonnement (le visible) qui se transforme en électricité, on propose une nouvelle configuration géométrique et technologique au capteur hybride PVT à eau et nano-fluide. On placera le capteur PV de manière à ce qu'on ait un meilleur refroidissement, ceci en évitant les parties du rayonnement créant la surchauffe du panneau. On propose donc que le panneau photovoltaïque sera placé au-dessous d'une couche d'eau. Un vitrage est placé entre l'eau et l'air ambiant pour la protection. Le canal de refroidissement sera donc placé au-dessus du PV (ce qui n'est pas été le cas dans les études antérieures y compris dans les thèses de Master de H. Kaidouchi et M.OULD Sid Ahmed)[1 ,2] de forme rectangulaire ayant les mêmes dimensions que le capteur PV. Les cellules solaires photovoltaïques transforment la lumière solaire incidente en différence de potentiel et courant électrique, tandis que la partie du capteur thermique sera absorbé en deux parties la 1^{ère} partie absorbée par le nano-fluide du rayonnement infrarouge, alors que la 2^{ème} partie sera par convection lors du refroidissement du PV par le nano-fluide et la surface du PV. La face inférieure est isolée.

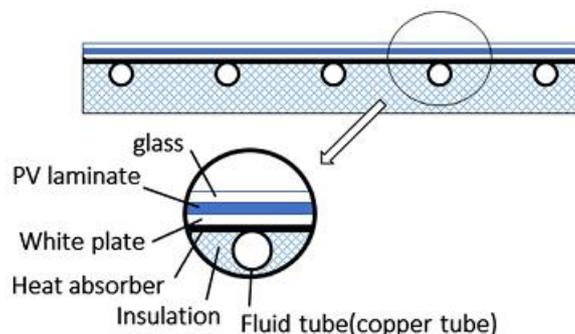


Figure 3- 6: Schéma de Capteur PV/T Classique

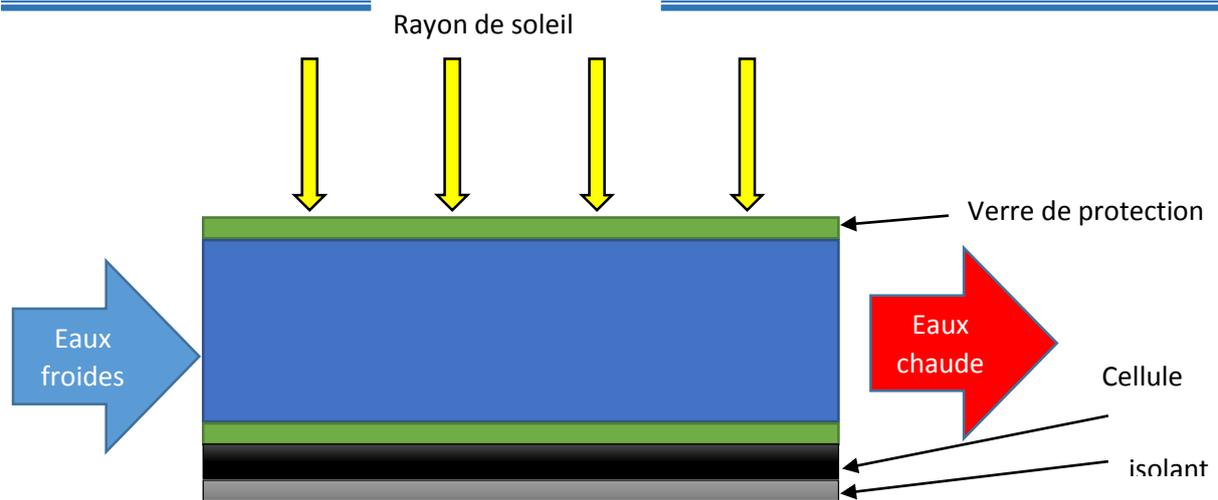


Figure 3- 7: Schéma du Capteur PV/T Proposé

Le capteur hybride PV/T permet d'optimiser l'utilisation de l'énergie solaire en disposant à la fois d'une source d'énergie électrique et une circulation d'un fluide caloporteur. À partir d'une modélisation on peut calculer les caractéristiques du fonctionnement du capteur en fonction des facteurs extérieurs variables tel que la température de l'environnement et la quantité de rayonnement solaire reçue par la surface du capteur. Ce chapitre est destiné pour détailler un modèle mathématique à partir duquel on peut simuler le flux de chaleur dans les différentes couches constituant le capteur étudié. Dans la première partie on va présenter le capteur étudié puis on va poser des hypothèses simplificatrices qui nous servent de simplifier les équations fondamentales constituant le modèle. Dans la deuxième partie on va mettre ces équations sous forme d'un algorithme qu'on va programmer dans l'environnement de [Fortran 90](#). Après l'exécution du programme, on obtient les résultats du modèle qu'on a fait.

3-3. Présentation du capteur étudié :

La plus grande partie du rayonnement solaire absorbé par les cellules solaires n'est pas convertie en électricité et accroît leur température, entraînant ainsi une baisse de leur rendement électrique. Les capteurs solaires PV/T hybrides sont des systèmes utilisant des panneaux PV comme absorbeur thermique. Par récupération d'une partie de la chaleur dissipée par les panneaux PV à l'aide d'un fluide caloporteur (l'eau et le nano-fluide ZnO-Eau pour la présente étude), ces capteurs solaires hybrides permettent la production simultanée d'énergies thermique et électrique. La production de ces énergies dépend des plusieurs paramètres d'entrée et sortie : le rayonnement solaire, la vitesse du vent, la température ambiante et de fluide caloporteur.

Ce capteur se compose de :

- ✓ Vitrage : comme plaque supérieure du canal de refroidissement.

- ✓ Panneau solaire photovoltaïque : son rôle est de transformer le rayonnement solaire en l'électricité.
- ✓ Fluide caloporteur : (eau ou nano-fluide ZnO-eau) son rôle d'évacuer la chaleur emmagasinée par la surface absorbante.
- ✓ L'isolant à l'arrière du PVT : pour minimiser les pertes thermiques.

3-4. Modèle thermique :

Les modèles théoriques servent à calculer (prédire) la production thermique des capteurs hybrides, ces modèles se basent sur la distribution du flux de la chaleur dans les différentes couches du capteur hybride. Mais pour simplifier ce modèle on doit prendre en considération des hypothèses simplificatrices. Une fois ce modèle fini, les résultats du calcul seront comparés à des valeurs expérimentales (soient réalisées par soit même, ou bien prises à partir des publications internationales par d'autres auteurs)

3-5. Hypothèses Simplificatrices Proposées :

1 Le transfert de chaleur par conduction à travers le vitrage, le silicium ainsi que la couche d'eau ou nano-fluide est monodimensionnel. C'est-à-dire que la chaleur diffuse uniquement dans le sens transversal. Cette hypothèse est justifiée par l'étude de H. A. Zondag *et al.* en 2002[54]. Ils ont trouvé que la différence entre l'efficacité du modèle 1D et celle du modèle 3D voisine 3%.

1. Le régime est permanent ($\partial T/\partial t=0$). C'est-à-dire qu'on va considérer que les performances du capteur dépendent de la température moyenne de la journée prélevée du fichier météo.
2. Le fluide est de l'eau ou un nanofluide ZnO-Eau.
3. Les propriétés physiques des matériaux sont supposées constantes
4. La température ambiante pré du capteur est uniforme.
5. La vitesse du fluide est uniforme.
6. Les pertes par rayonnements au fond et aux surfaces latérales de l'isolant sont supposées négligeables.
7. Le verre qui surplombe le canal du fluide est net de toute poussière ou sable.
8. L'écoulement à l'intérieur du canal est laminaire totalement établi thermiquement et hydrodynamique.
9. La convection dans le canal est forcée.
10. Pas de terme source.
11. La face en bas du canal est adiabatique.

12. Le canal de refroidissement est soumis sur la face du haut à un flux de chaleur constant Q_1'' et en bas à un autre flux différent Q_2'' .

13. Les propriétés thermo-physiques pour l'air sont calculés à partir de $T_{bulk} = (T_{sortie\ fluide} + T_{entrée\ fluide})/2$.

3- 6. Bilan thermique du capteur hybride PV/T à base de nano-fluide proposé :

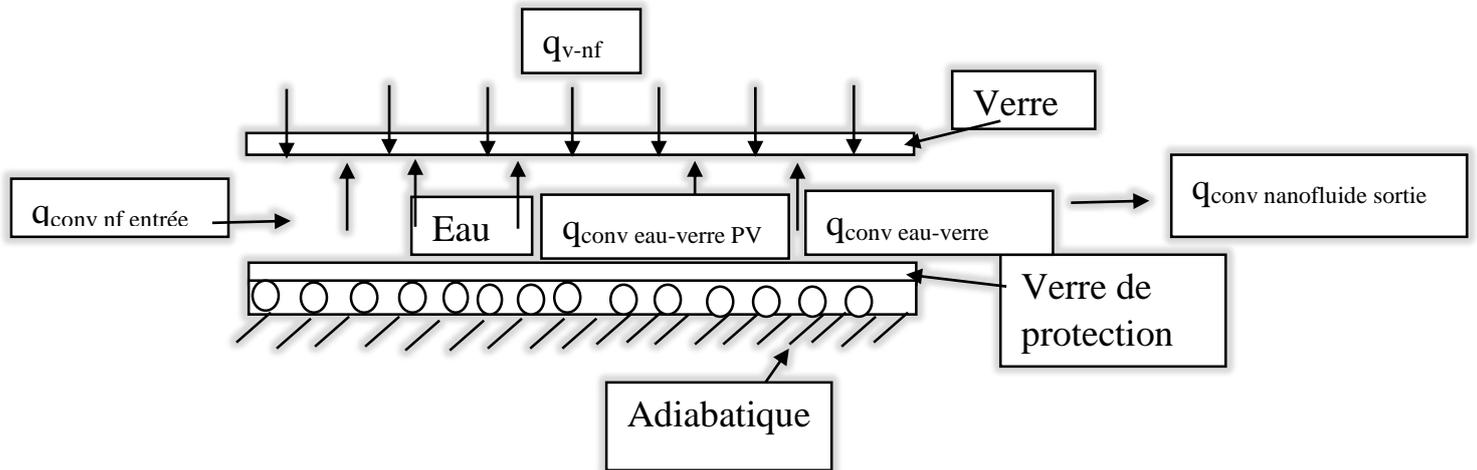


Figure 3- 8: Bilan total du Capteur Hybride PV/T Proposé à Base de Nano-fluide

Bilan d'énergie sur un élément de volume ($H \cdot l \cdot \delta x$)

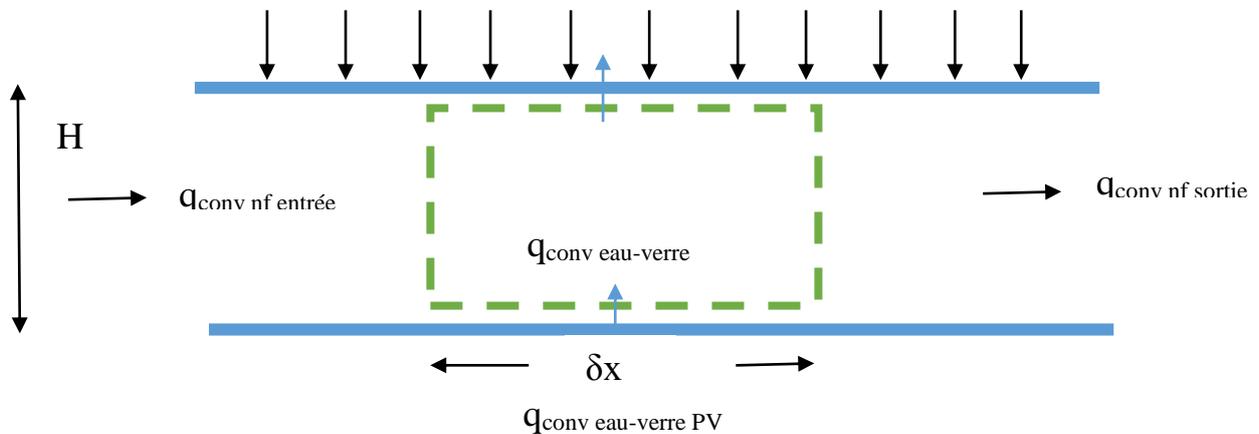
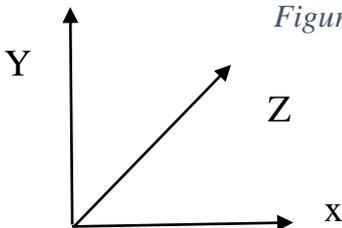


Figure 3- 9: Bilan d'Énergie sur un Volume de Contrôle



Chapitre III : Modélisation du Nouveau Capteur Hybride PVT, Bilan Thermique et Algorithme de Calcul

Le canal de refroidissement est de hauteur H , la longueur et la largeur du canal sont égales à celles du capteur PV, respectivement.

$$\begin{aligned} L_{\text{canal}} &= L_{\text{PV}} \\ l_{\text{canal}} &= l_{\text{canal}} \end{aligned}$$

$$q''_{\text{conv in-eau}} = (V_{\text{moy}} \cdot \rho \cdot c)$$

$$q''_{\text{conv out-eau}} = (V_{\text{moy}} \cdot \rho \cdot c) \left(T_{\text{moy}}(x) + \frac{\partial T_{\text{moy}}}{\partial x} \cdot \partial x \right)$$

Le bilan :

$$+q''_{\text{conv e-nf}} - q''_{\text{conv s-nf}} + q''_{\text{conv v-nf}} + q''_{\text{conv PV}} = 0 \quad (1)$$

En considérant le régime permanent, le bilan énergétique sur un élément de volume ($H \cdot l \cdot \delta x$) est donné comme :

$$\begin{aligned} & (H \cdot l \cdot V_{\text{moy}} \cdot \rho \cdot c) \cdot T_{\text{moy}}(x) - (H \cdot l \cdot V_{\text{moy}} \cdot \rho \cdot c) \cdot \left(T_{\text{moy}}(x) + \frac{\partial T_{\text{moy}}}{\partial x} \cdot \partial x \right) + \\ & q''_{\text{conv v-nf}} \cdot (l \cdot \delta x) + \bar{h}_{\text{conv nf-PV}} \cdot (l \cdot \delta x) \cdot (T(x)_{\text{PV}} - T_{\text{moy}}(x)) = 0 \end{aligned} \quad (2)$$

Après simplification :

$$-(H \cdot l \cdot V_{\text{moy}} \cdot \rho \cdot c) \cdot \frac{\partial T_{\text{moy}}}{\partial x} \cdot \partial x + \bar{h}_{\text{conv nf-PV}} \cdot (l \cdot \delta x) \cdot (T_{\text{PV}}(x) - T_{\text{verre}}(x)) + q''_{\text{conv v-nf}} \cdot (l \cdot \delta x) \quad (3)$$

$$-(H \cdot V_{\text{moy}} \cdot \rho \cdot c) \cdot \frac{\partial T_{\text{moy}}}{\partial x} \cdot \partial x + \bar{h}_{\text{conv nf-PV}} \cdot (T_{\text{PV}}(x) - T_{\text{verre}}(x)) + q''_{\text{conv v-nf}} \quad (4)$$

Ceci en considérant que pour un écoulement interne dans un canal de section droite rectangulaire,

$$\Rightarrow \frac{\partial T_{\text{moy}}}{\partial x} (H \cdot V_{\text{moy}} \cdot \rho \cdot c) + T_{\text{moy}}(x) \cdot (\bar{h}_{\text{conv nf-PV}}) + q''_{\text{conv v-nf}} - \bar{h}_{\text{conv nf-PV}} \cdot T_{\text{PV}}(x) = 0 \quad (5)$$

$$T_{\text{PV}}(x) = \frac{(q''_{\text{incident PV}} - 0.147)}{\bar{h}_{\text{conv nf-PV}}} + T_{\text{moy}}(x) \quad (6)$$

En remplaçant l'équation (6) dans (5) on aura :

$$\bar{h}_{\text{conv nf-PV}} \cdot T_{\text{PV}}(x) = -(q''_{\text{incident PV}} - 0.147) - \bar{h}_{\text{conv nf-PV}} \cdot T_{\text{moy}}(x)$$

Avec :

$$q''_{\text{incident PV}} = [-0.0781 \cdot \ln(H) + 0.73] \cdot q''_{\text{conv v-nf}} \quad (7)$$

L'équation (5) devient :

$$\frac{\partial T_{\text{moy}}}{\partial x} (H \cdot V_{\text{moy}} \cdot \rho \cdot c) + T_{\text{moy}}(x) \cdot (\bar{h}_{\text{conv nf-PV}}) - q''_{\text{conv v-nf}} - \bar{h}_{\text{conv nf-PV}} \cdot T_{\text{m}}(x) - q''_{\text{incident PV}} + 0.147 = 0 \quad (8)$$

$$\frac{\partial T_{moy}}{\partial x} (H \cdot V_{moy} \cdot \rho \cdot c) - q''_{conv\ v-nf} - q''_{incident\ PV} + 0.147 = 0$$

$$\frac{\partial T_{moy}}{\partial x} = A \quad (9)$$

Avec :

$$A = \frac{q''_{conv\ v-nf} + q''_{incident\ PV} - 0.147}{H \cdot V_{moy} \cdot \rho \cdot c}$$

L'intégration donne :

$$T_{moy}(x) = A \cdot x + B \quad (\text{Linéaire}) \quad (10)$$

C.L :

$$(x) = 0 \rightarrow T_{moy}(0) = T_{entrée\ nf}$$

$$T_{moy}(x) = A \cdot x + T_{entrée\ nf}$$

Remarque :

Les propriétés thermo-physiques du nano-fluides sont déterminées à partir de la température du bulk ($T_{bulk} = (T_{entrée\ nf} + T_{sortie\ nf})/2$)

(Ici on considère un écoulement totalement établi du point de vue thermique et hydrodynamique)

$$T_{bulk} = (T_{entrée\ nf} + \frac{A \cdot L}{2}) \quad (11)$$

$$Nu_1 = \frac{\bar{h}_1 \cdot 2H}{\lambda_{nf-1}}$$

$$Nu_2 = \frac{\bar{h}_2 \cdot 2H}{\lambda_{nf-2}}$$

Shah et London (1971) [55] proposent que lorsque la dissipation visqueuse et les sources thermiques d'énergie interne sont négligées, l'équation de l'énergie devient linéaire et homogène ; et par suite le problème complexe peut être traité par la superposition de solutions fondamentales

Si les flux de chaleur sont constants mais différents et spécifiés à chaque paroi comme c'est exactement notre cas, le capteur PV/T reçoit deux flux différent l'un sur le verre supérieur, l'autre du capteur PV vers le nano-fluide, respectivement. La solution à ce problème est la superposition de deux problèmes identiques à savoir : un écoulement dans un canal dont une face est adiabatique, alors que l'autre est soumise à un flux constant. Pour notre cas, il se rapproche d'un écoulement entre deux plaques planes et parallèles, car la distance entre les deux plaques (inférieure et supérieure) qui est de l'ordre de quelques cm, comparativement à la largeur du canal (largeur du capteur PV qui est en générale de l'ordre de 1-m) est négligeable. De fait le rayon hydraulique se réduira à l'expression assez simple $Dh=2H$, avec H hauteur du canal qui est en même temps la distance entre les plaques.

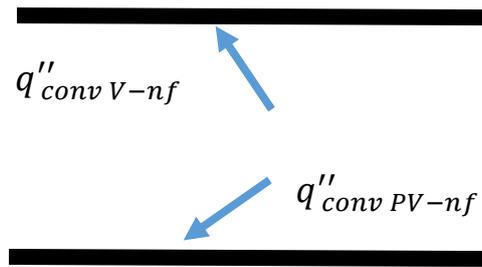


Figure 3- 10: Spécification de deux flux de chaleur différents pour des plaques planes et parallèles

Lorsque

$q''_{conv V-nf} \neq q''_{conv PV-nf}$ alors le nombre de Nusselt devient :

$$Nu_1 = \frac{140}{\left(26-9\left(\frac{q''_{conv PV-nf}}{q''_{conv V-nf}}\right)\right)}$$

$$Nu_2 = \frac{140}{\left(26-9\left(\frac{q''_{conv V-nf}}{q''_{conv PV-nf}}\right)\right)}$$

Le nombre de Reynolds :

$$Re = \frac{V_{moy} \cdot (2H)}{\vartheta_{nf}} \Rightarrow V_{moy} = \frac{Re \cdot \vartheta_{nf}}{(2H)}$$

Bilan énergétique sur la vitre de protection :

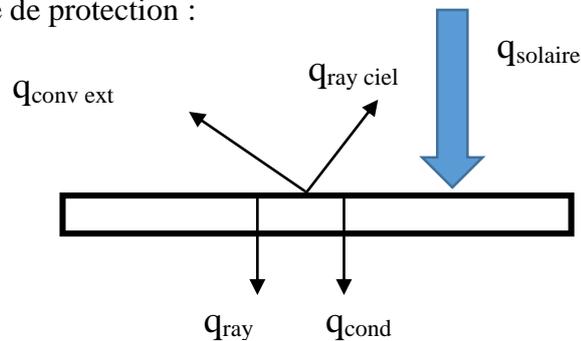


Figure 3- 11: Les Flux de Chaleur Dans la Vitre de Protection

$$q''_{solaire} = (q''_{ray} + q''_{cond}) + (q''_{conv ext} + q''_{ray ciel}) \quad (12)$$

$$q''_{conv ext} = \bar{h}_{conv ext} = (T_V - T_{amb})$$

$$\bar{h}_{conv ext} = 2,8 + 3V_{vent}$$

$$q''_{cond} = \left(\frac{\lambda}{\delta}\right)_{vitrage} \cdot (T_{V ext}(x) + T_{V int}(x))$$

$$q''_{ray ciel} = \sigma \varepsilon_{verre} \cdot (T_V^4 - T_{ciel}^4)$$

$$T_{ciel} = 0,0052 \cdot (T_{amb}(k))^{1,5}$$

Bilan énergétique sur le capteur PV/T :

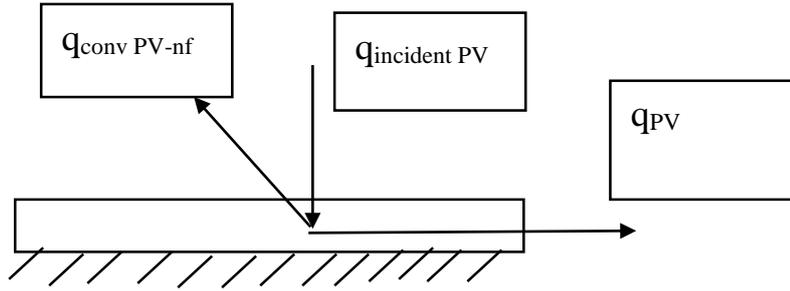


Figure 3- 12: Le flux de chaleur sur la plaque PV

$$q''_{incident\ PV} = q''_{PV} + q''_{conv\ PV-nf} \quad (13)$$

$$q''_{conv\ PV-nf} = \left(\frac{\lambda_{nf}}{2H}\right) \cdot \frac{140 \cdot (T_{PV}(x) + T_{moy}(x))}{\left(26 - 9 \left(q''_{conv\ V-nf} / q''_{conv\ PV-nf}\right)\right)} \quad (14)$$

$$q''_{conv\ V-nf} = \left(\frac{\lambda_{nf}}{2H}\right) \cdot \frac{140 \cdot (T_{Vint}(x) + T_{moy}(x))}{\left(26 - 9 \left(q''_{conv\ PV-nf} / q''_{conv\ V-nf}\right)\right)} \quad (15)$$

$$q''_{incident\ PV} = [-0.0781 \cdot \ln(H) + 0.73] \cdot q''_{ray} \quad (16)$$

$$q''_{pv} = 0.127[1 - 0.0063(T_{PV}(x) - 25^\circ c)] \quad (17)$$

Le rendement électrique d'un capteur PV/T est :

$$\eta_{elec} = \frac{q''_{pv}}{q''_{solaire}} \quad (18)$$

Le rendement thermique d'un capteur PV/T est :

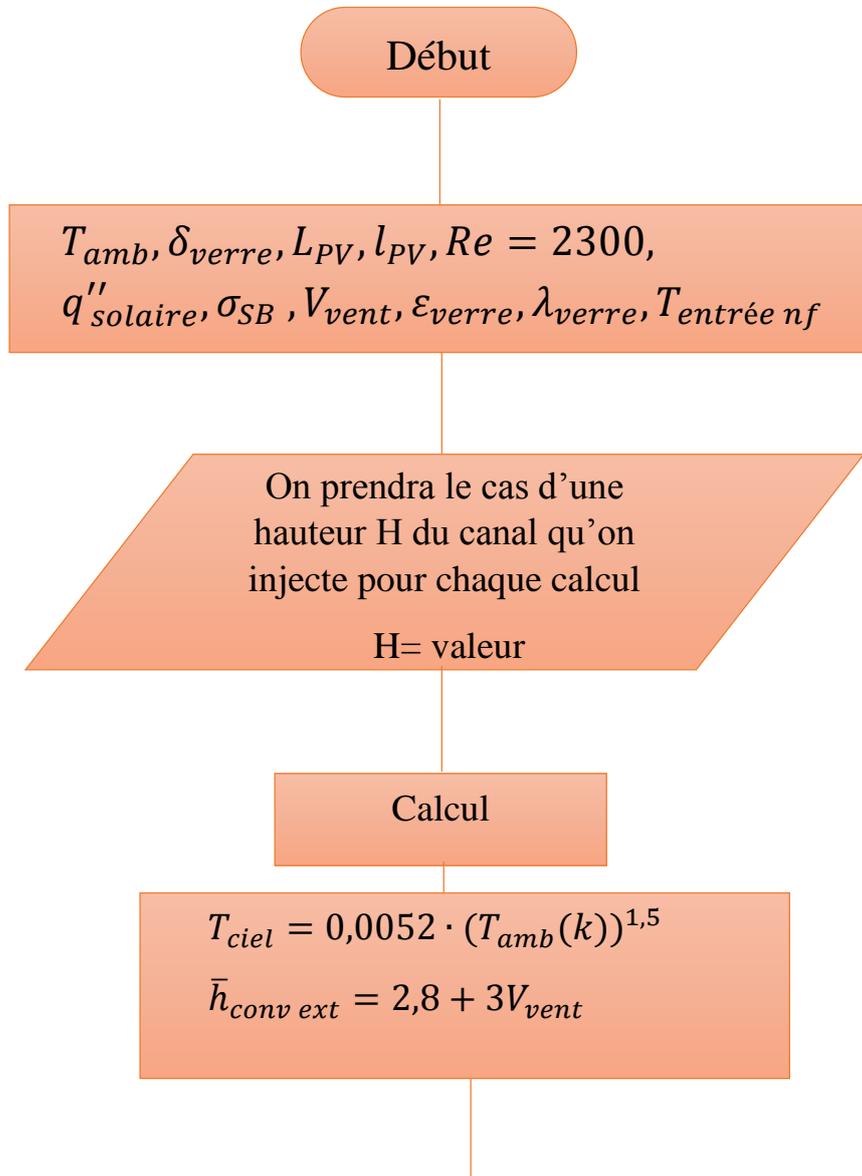
$$\eta_{th} = \frac{H(T_{mou}(L) + T_{entrée\ nf}) \cdot V_{moy} \cdot \rho \cdot c}{long\ PV \cdot q''_{solaire}} \quad (19)$$

Le rendement total est :

$$\eta_{total} = \eta_{elec} + \eta_{th} \quad (20)$$

Les propriétés thermo-physiques de l'eau sont déterminées en fonction de la température sont donnés dans la référence [56]

3-7. Algorithme de Calcul :



On suppose :

$$q''_{conv\ v-nf} + q''_{incident\ PV} = 10$$

$$T_{bulk} = T_{entrée\ nf} + \frac{A \cdot L_{PV}}{2}$$

$$\Rightarrow A = (T_{bulk} - T_{entrée\ nf}) \cdot 2/L_{PV}$$

On suppose : $T_{bulk} = T_{amb}$ (Initialement)

Calcul des propriétés thermo-physiques du fluide (nano-fluide)

Cas de l'eau on calcule : ρ , c_p , λ et ν à la température du bulk qu'on a considéré

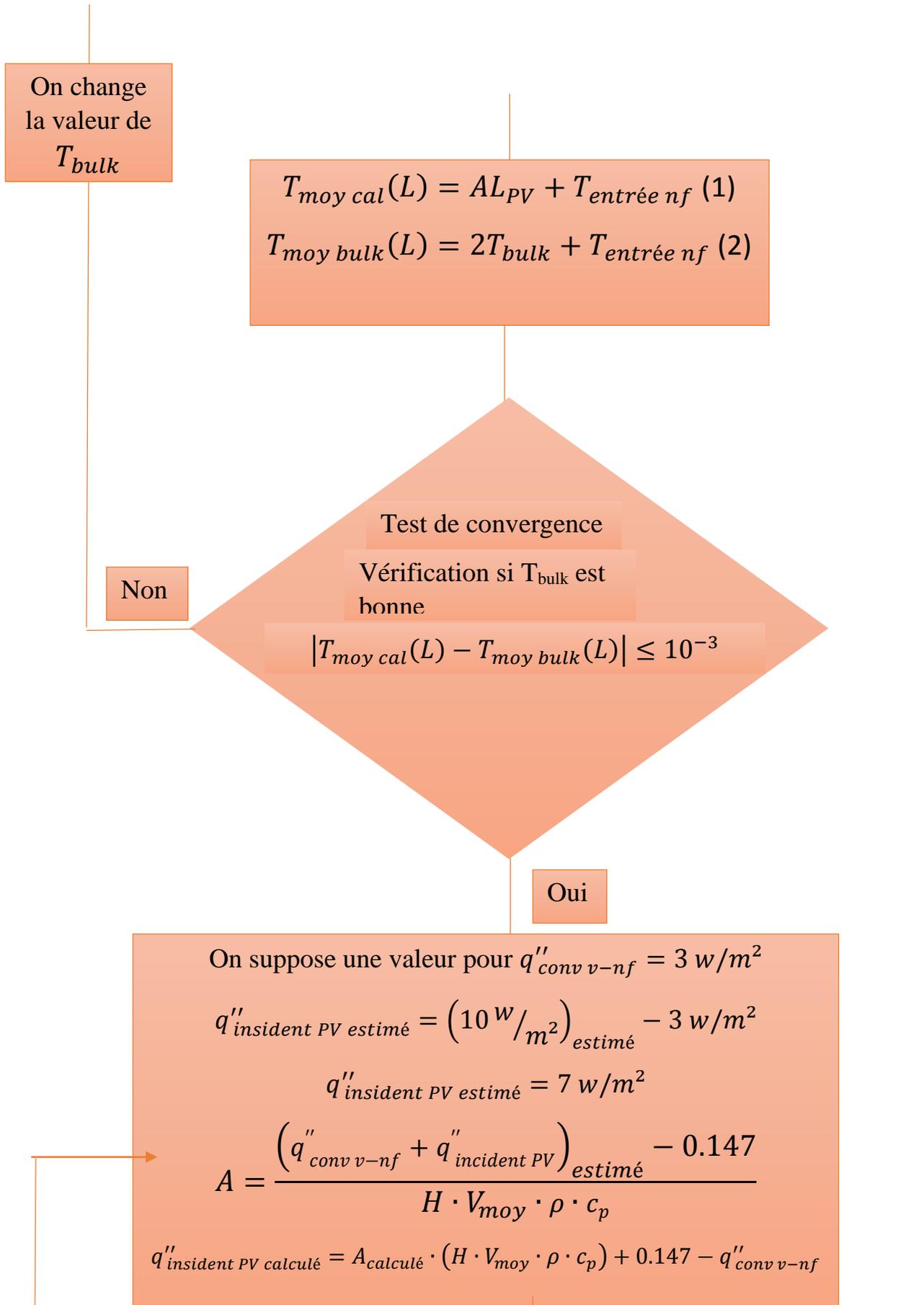
$$\rho = f(T_{bulk}) \quad \lambda = f(T_{bulk})$$

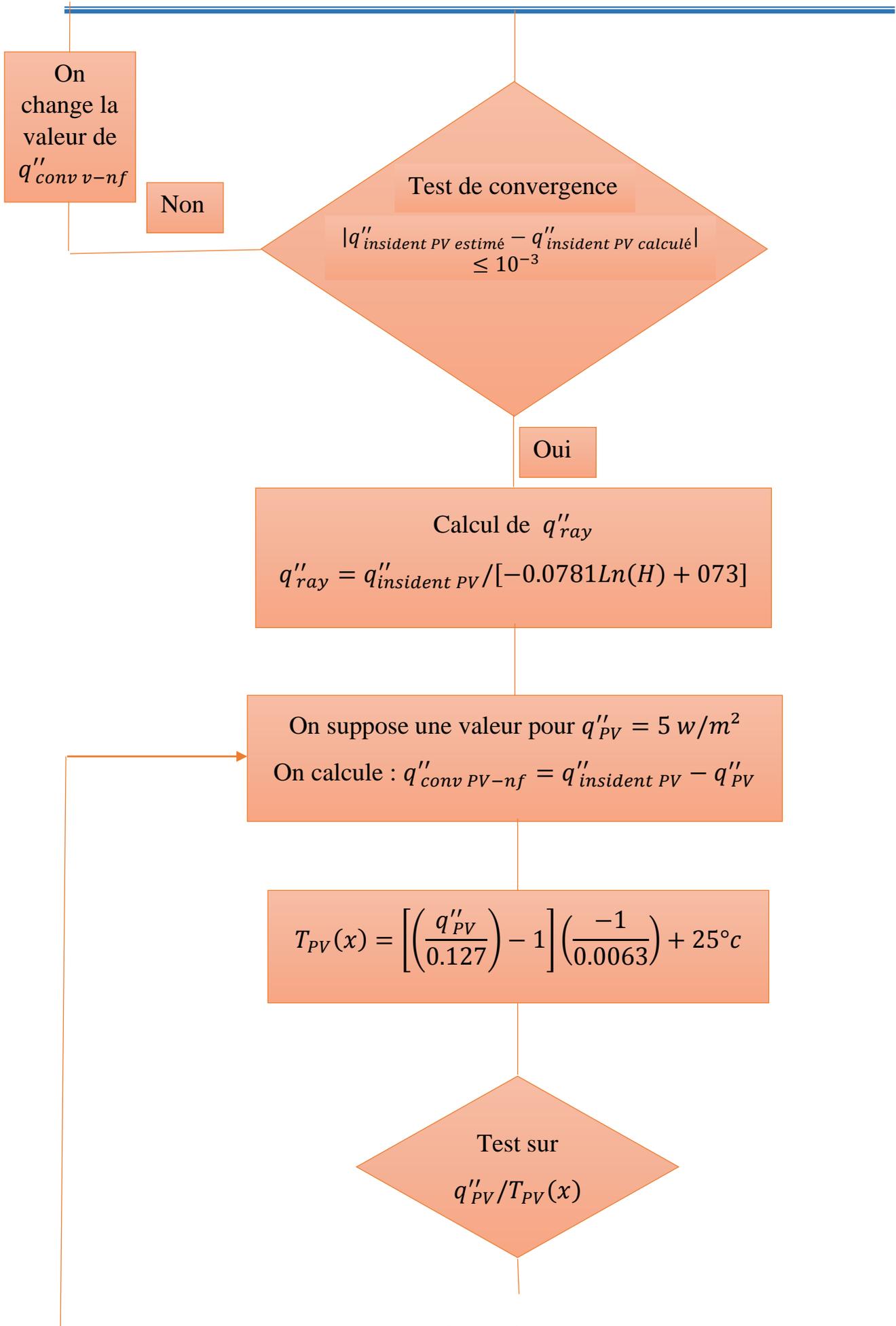
$$c_p = f(T_{bulk}) \quad \nu = f(T_{bulk})$$

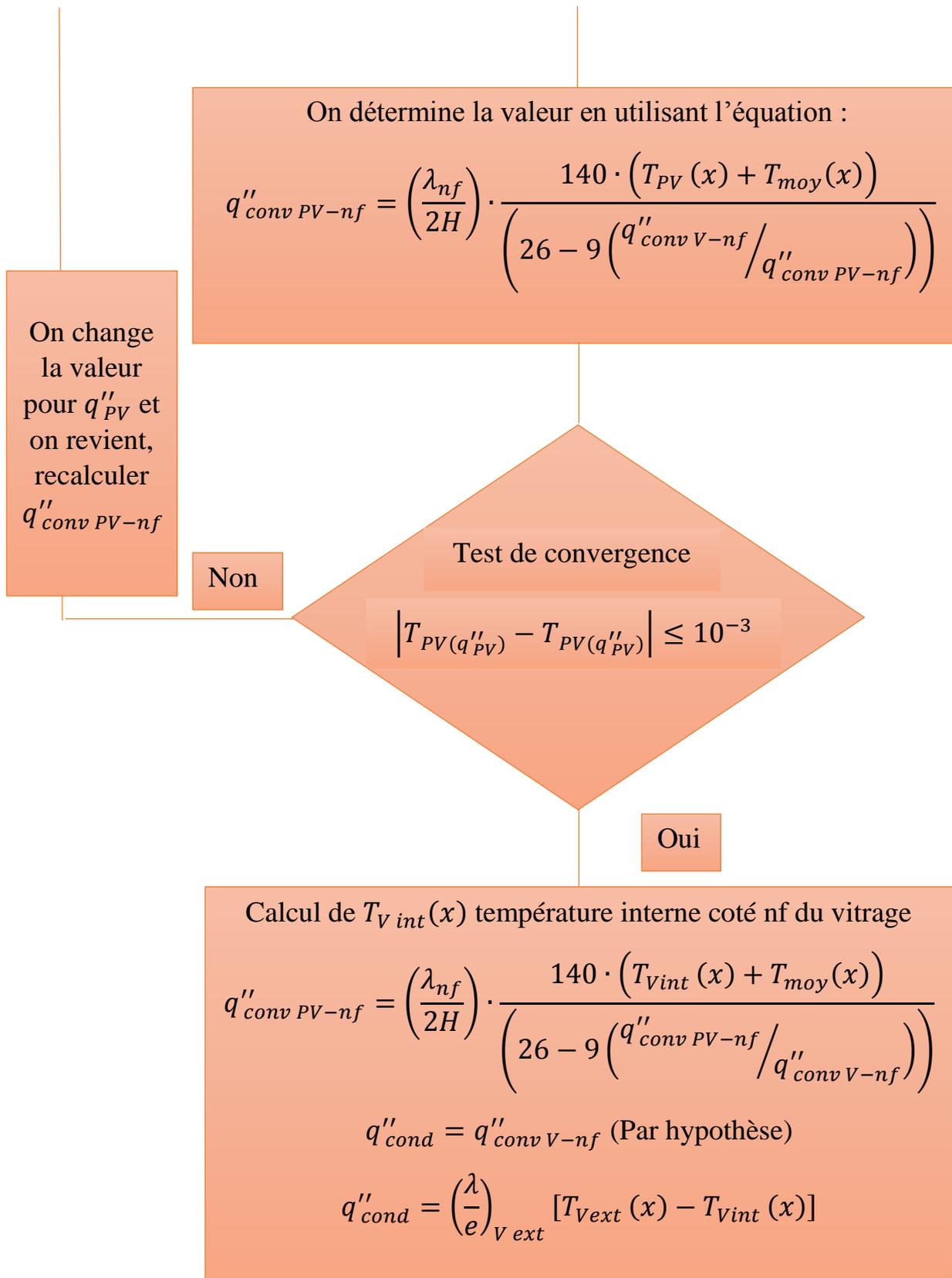
On calcule :

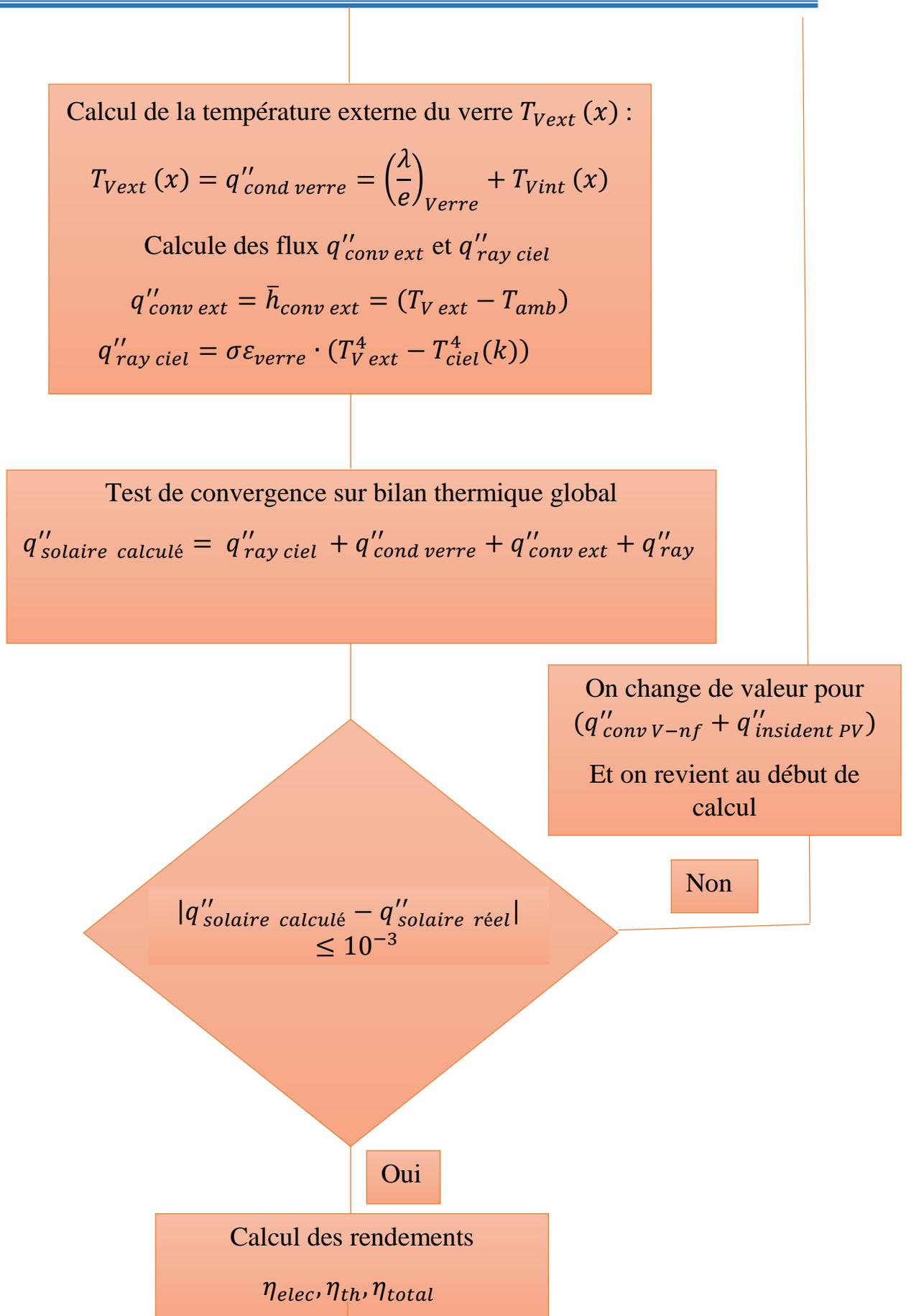
$$V_{moy} = \frac{Re \cdot \nu}{2H} = \frac{2500 \cdot \nu}{2H}$$

$$A = \frac{\left(q''_{conv\ v-nf} + q''_{incident\ PV} \right) - 0.147}{H \cdot V_{moy} \cdot \rho \cdot c_p}$$









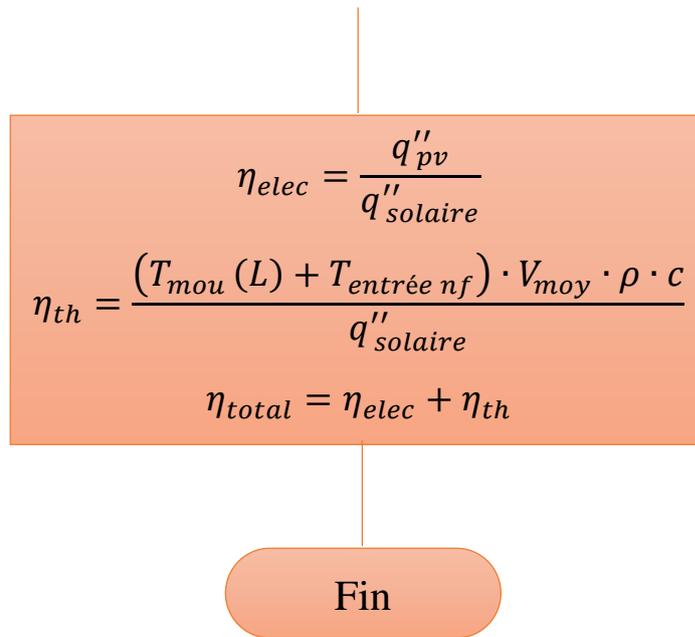


Figure 3-13 :

Figure 3- 13: Organigramme du Programme de Calcul

3-8. Conclusion

Pour la raison du coût élevé de l'expérimentation (méthodes d'élaboration et techniques de fabrication), les chercheurs ont souvent recouru à la modélisation comme un outil efficace pour étudier un système de physique quelconque. Pour cela on a consacré ce chapitre juste pour faire un modèle analytique qui nous permet après l'avoir programmé, de simuler le fonctionnement du capteur hybride PV/T à base d'eau ou nano-fluide ce qui nous permet aussi de connaître les paramètres intervenant dans les différents rendements de la nouvelle conception du capteur hybride PVT avec refroidissement en haut du capteur PV, laissant passer la partie du spectre visible, partie la plus importante dans la conversion photovoltaïque. Dans le chapitre qui suit nous allons exposer et expliquer quelques résultats importants de la simulation.

4-1. Aperçus sur le Chapitre IV

Dans ce chapitre, on présentera quelques résultats obtenus au cours des simulations. Il s'agira entre autres, des effets de la température ambiante T_{amb} , du nombre de Reynolds, du flux solaire direct incident $Q_{solaire}$, ainsi que la hauteur de canal de refroidissement H , sur les rendements électrique, thermique, global ainsi que la température du capteur photovoltaïque.

Une comparaison entre les résultats du PVT à eau et à nano-fluide ZnO-eau est fait afin de voir jusqu'à quel point une différence existe et si oui ou non le nano-fluide considéré améliore les performances du PVT. D'après le chapitre deux, on a vu que si la masse volumique, cependant, ils nombreux auteurs ont concluent qu'il existe aucun modèle de prédiction de la conductivité thermique et à un degré moindre la viscosité dynamique des nano-fluides. Par conséquent, il a été décidé dans le présent travail de prendre les mesures expérimentales du nanofluide ZnO-eau pour ce qui concerne la viscosité dynamique, et d'utiliser des relations connues pour leur fiabilité pour la masse volumique et la chaleur spécifique.

Pour la conductivité thermique, deux approches ont été utilisées : les mesures expérimentales et les corrélations et voir jusqu'à quelle un des modèle prédit la conductivité effective du nano-fluide. Pour ce faire, on comparera deux corrélations utilisées pour prédire la conductivité effective des nanofluides : la corrélation de Cross-Hamilton et celle de Bruggeman, respectivement. Grâce à des mesures expérimentales faites par Fouillard *et al.*, la corrélation Cross-Hamilton s'avéra être celle donnant les meilleures prédictions. Elle sera donc utilisée dans toutes les simulations du PVT à nanofluide ZnO-eau. Pour la conductivité thermique des nanostructures ZnO qui reste la principale difficulté et source donc de la plus grande incertitude dans la prédiction de la conductivité en utilisant les deux corrélations su citées, on prendra les résultats des simulations de Chantrenne et Ould Lahoucine. Finalement, aux meilleures de nos connaissances, une configuration similaire du PVT n'existe pas encore. De ce fait, une validation avec des résultats expérimentaux n'a pas été faite. Tous les résultats ont été obtenus par un code de calcul qui a été développé au cours de ce travail de master, et écrit en Fortran 90.

4-2. Propriétés Thermiques du Nano-fluide ZnO-Eau Nano-fluide

- 1) **La masse volumique** : On utilise la formule suivante pour l'estimation de la masse volumique (kg/m^3) du nano-fluide ZnO-Eau qu'on utilise dans nos calculs de simulation :

$$\rho_{nf} = (1 - \varphi)\rho_{eau} + \varphi \cdot \rho_{np} \quad (4-1)$$

Avec : φ : fraction volumique des nanoparticules dans le fluide (%)

ρ_{eau} : masse volumique de l'eau (kg/m^3)

ρ_{nf} : masse volumique du nanofluide (kg/m^3)

ρ_{np} : masse volumique des nanoparticules (kg/m^3)

D'après l'étude de Ferrouillat *et al.*, les nanoparticules de forme polygonale (Nyacol) ont une fraction volumique $\varphi = 0.82\%$ tandis que les nanoparticules de forme tubulaire (Evonik) $\varphi = 0.93\%$, respectivement. La masse volumique du ZnO (bulk) = $5606 \text{ (kg/m}^3\text{)}$. Cette valeur ne varie pas avec l'échelle. On l'utilise ainsi dans les calculs des nanostructures.

2) **Chaleur Spécifique Cp(J/kg·K) :**

La chaleur spécifique à pression constante du nanofluide ZnO-Eau se calcule par la formule suivante :

$$Cp_{nf} = (1 - \varphi_m)Cp_{eau} + \varphi_m Cp_{np} \quad (4-2)$$

Avec : φ_m : fraction massique des nanoparticules dans le fluide (%)

Cp_{eau} : chaleur spécifique de l'eau (J/kg·K)

Cp_{nf} : chaleur spécifique du nanofluide (J/kg·K)

Cp_{np} : chaleur spécifique des nanoparticules (J/kg·K)

La chaleur spécifique à volume constant Cv (égale à celle de la pression constante pour les solide Cp) en fonction de la température du ZnO est donnée sous forme de corrélation tirée de l'étude de P. Chantrenne et C. Ould Lahoucine (Prediction of the Thermal Conductivity of ZnO Nanostructures, ASME Journal of Heat Transfer, 042401-2, Vol. 134, April 2012) et a la forme suivante :

$$Cp_{ZnO} = Cv_{ZnO} = -0.0646 \cdot T(K)^2 + 55.718 \cdot T(K) - 876.33 \quad (J/kg \cdot K)$$

Viscosité Dynamique μ (Pa·s)

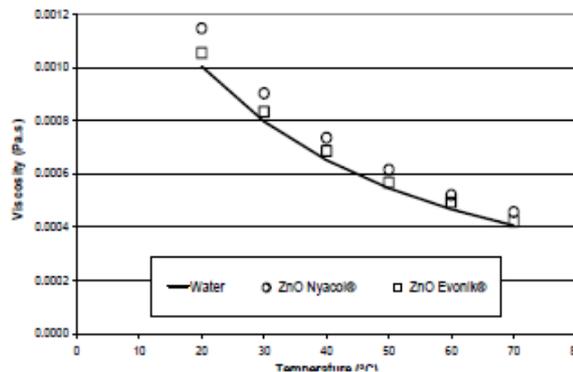


Figure 4- 1: Mesures Expérimentales de la Viscosité Dynamique du nano-fluide ZnO-eau [57]

Pour le nano-fluide ZnO-Eau, on a déterminé une corrélation à partir des mesures expérimentales de S. Ferrouillat *et al.* (Voir figure 4-3) sous la forme d'un polynôme du 2^{ème} degré

$$\mu_{nf} = 2 \cdot 10^{-7}T^2 - 3 \cdot 10^{-5}T + 0.0015 \text{ (Pour l'échantillon Evonik) } T (\text{°C})$$

$$\mu_{nf} = 2 \cdot 10^{-7}T^2 - 3 \cdot 10^{-5}T + 0.0017 \text{ (Pour l'échantillon Nyacol) } T (\text{°C})$$

Conductivité Thermique du Nano-fluide λ (W/m·K) :

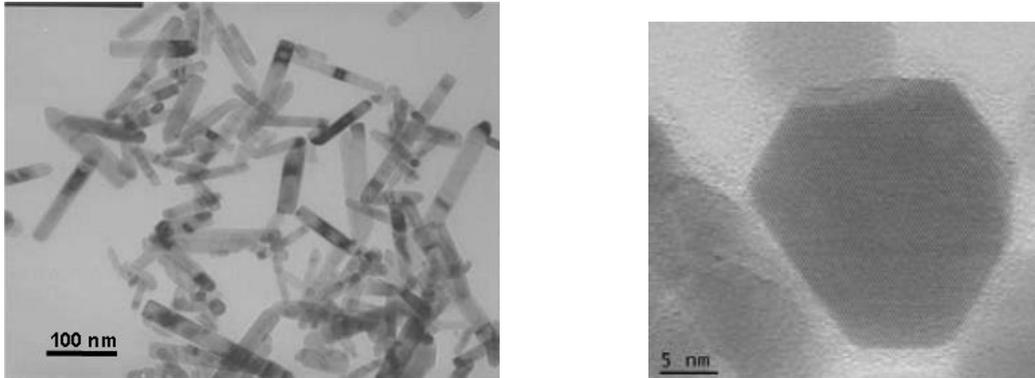


Figure 4- 2: (a) TEM image des nanoparticules du ZnO de forme nanotube (Evonik®).[57]

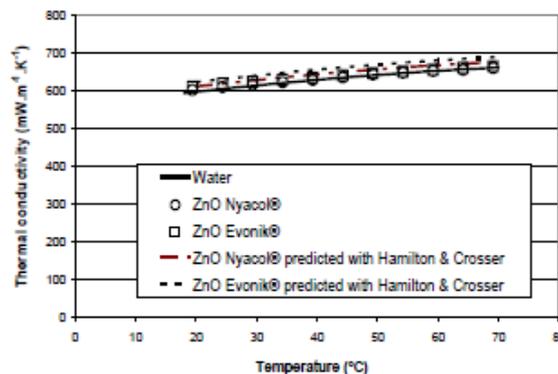


Figure 4- 3: Mesures Expérimentales de la Conductivité Thermique Effective du nanofluide ZnO-Eau et de l'Eau Pure [57]

Pour la conductivité thermique du nano-fluide ZnO-Eau, on a déterminé une corrélation à partir des mesures expérimentales de S. Ferrouillat *et al.* (Voir figure 4-2) sous la forme d'un polynôme du 2^{ème} degré, on a :

$$\lambda_{nf} = 8 \cdot 10^{-6}T^2 - 0.0019T + 0.5703 \quad \text{avec } T(^{\circ}\text{C}) \quad (4-3)$$

5) Estimation des Conductivités Thermiques des Nanostructures ZnO présents dans le Nano-fluide ZnO-Eau de l'étude de S. Ferrouillat et al. :

La conductivité thermique d'une nanostructure du type proche d'une tube ou nano-fil ZnO à la température ambiante (300K) ayant des dimensions $30 \times 30\text{-nm}^2$ et une longueur de 150-nm $\lambda_{np} = 23$ (W/m·K). La conductivité thermique d'une nanostructure proche d'une sphère de 30-nm de diamètre est approximativement égale à $\lambda_{np} = 12$ (W/m·K) à la température de 300 K. Ces deux valeurs déterminées à partir des calculs du modèle proposé par P. Chantrenne et **C. Ould Lahoucine** seront utilisées dans les modèles de Hamilton-Cross et Brugemann, respectivement. Les dimensions des nanostructures sont prises des photographies du microscope électronique à transmission (TEM) de la photo présentée en figure 1.

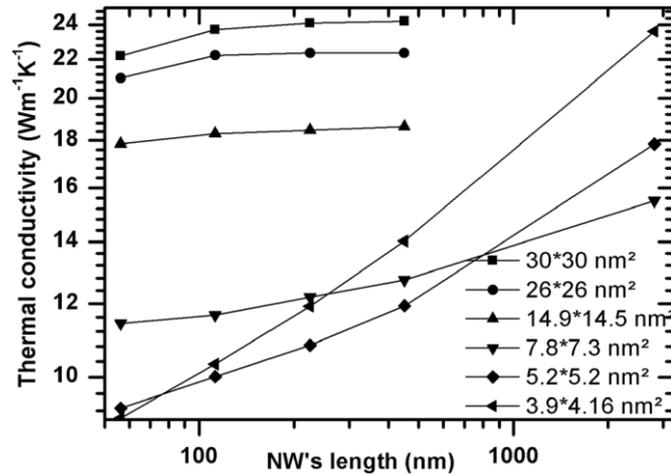


Figure 4- 4: Conductivité Thermique des Nanostructures ZnO en fonction de la longueur (nm) [58].

4 -3. Effet du nombre de Reynolds

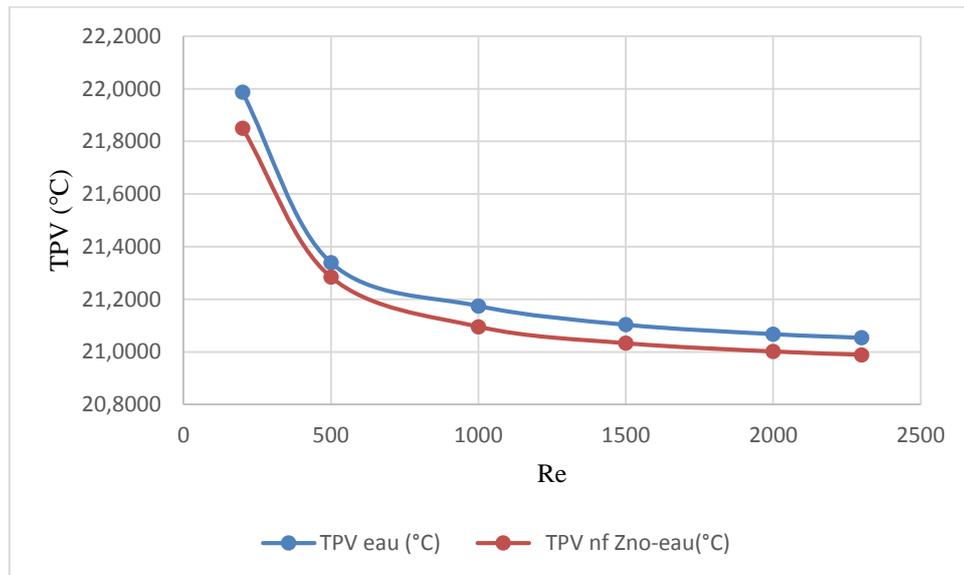


Figure 4- 5: Effet du Nombre de Reynolds sur la Température de la Cellule PV.

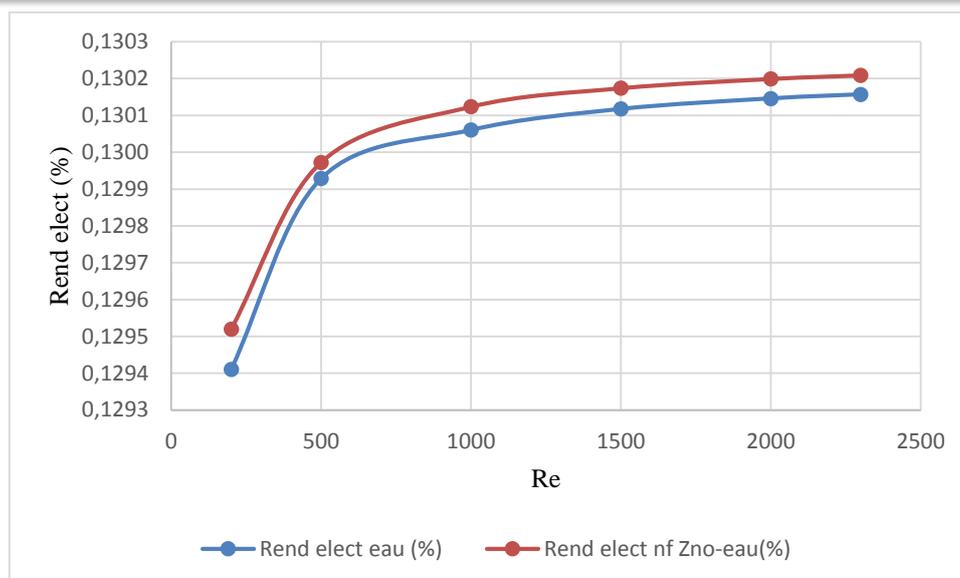


Figure 4- 6: Effet du Nombre de Reynolds sur le Rendement Electrique du PVT.

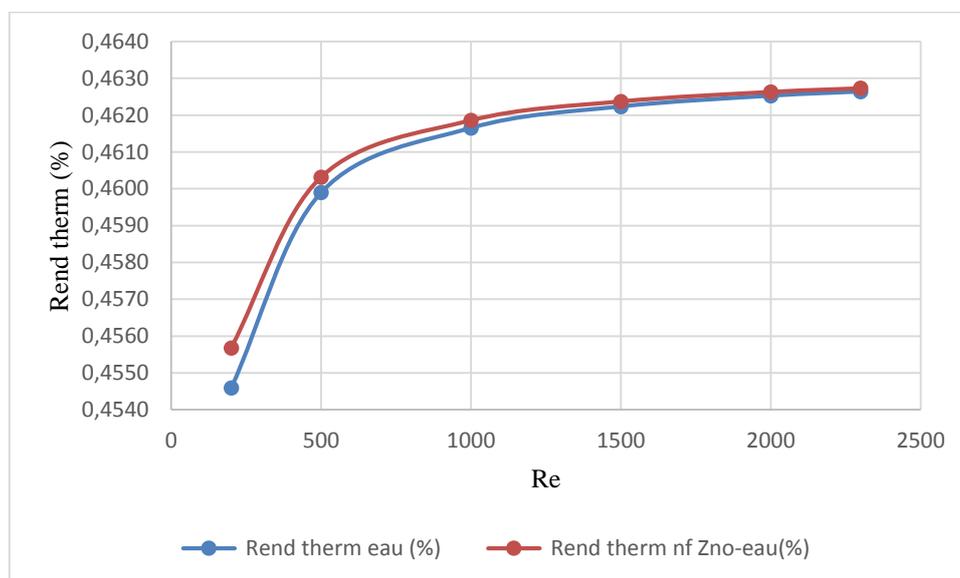


Figure 4- 7: Effet du Nombre de Reynolds sur le Rendement Thermique du PVT.

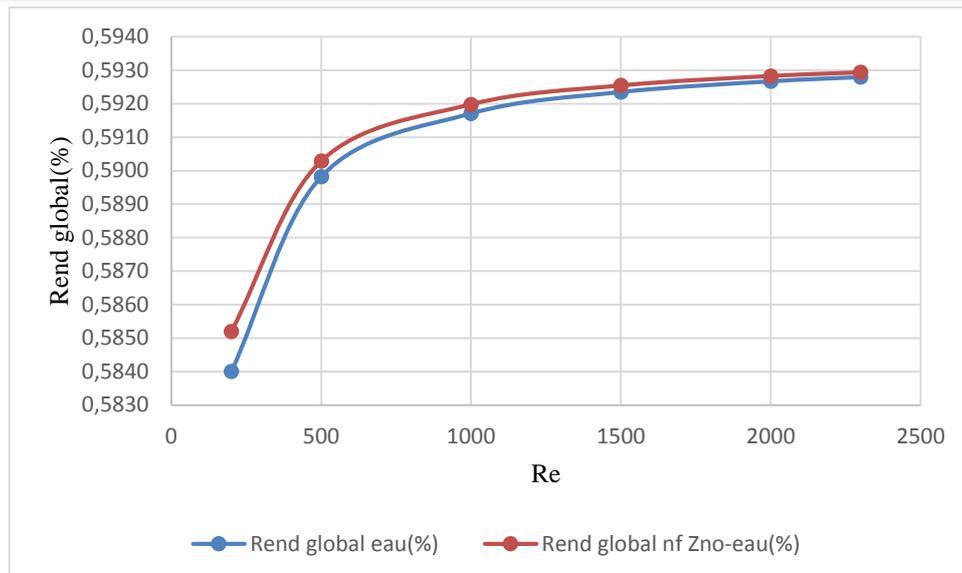


Figure 4- 8 : Effet du Nombre de Reynolds sur le Rendement Global du PVT.

L'effet du nombre de Reynolds montre clairement qu'un écoulement laminaire d'une valeur de 2000 atteint la saturation, de ce fait, il n'est pas utile d'avoir un écoulement turbulent afin d'augmenter le transfert de chaleur. Au contraire, si on augmente la valeur du Reynolds, à travers la vitesse d'écoulement, cela entraînera automatiquement une augmentation des pertes de charges dans le canal (proportionnelle au carré de la vitesse moyenne d'écoulement du fluide). L'autre remarque très importante concerne la comparaison des capteurs hybrides PVT à eau et à nanofluide ZnO-eau. Les figures IV-5-8 indiquent qu'aucune différence notable entre ces deux capteurs n'existe, ce qui n'est pas souvent le cas des conclusions de beaucoup d'études de transfert de chaleur utilisant les nanofluides (quoique beaucoup de résultats contradictoires existent aussi..).

4 -4. Effet du Rayonnement Solaire Incident $Q_{solaire}$

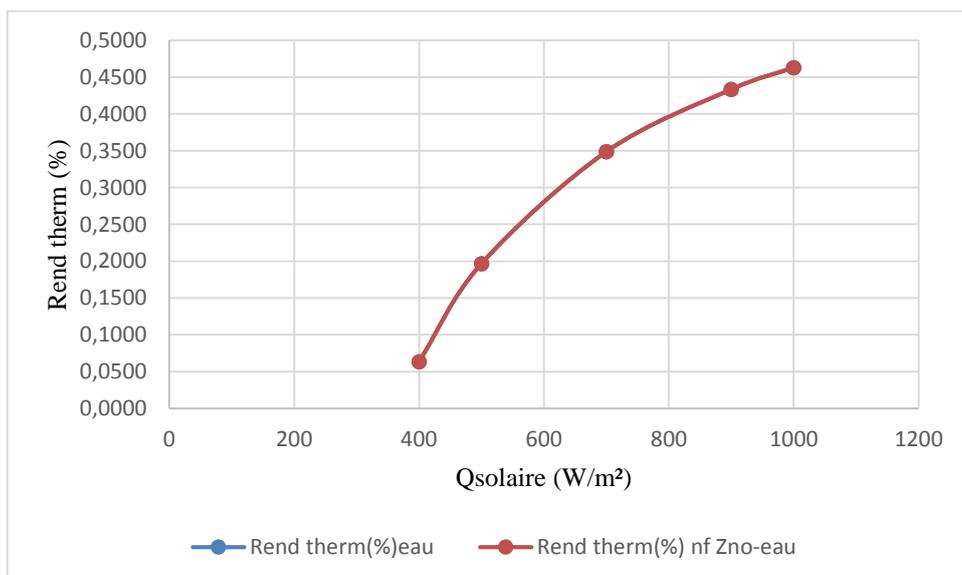


Figure 4- 9 : Effet du $Q_{solaire}$ sur le Rendement Thermique du PVT.

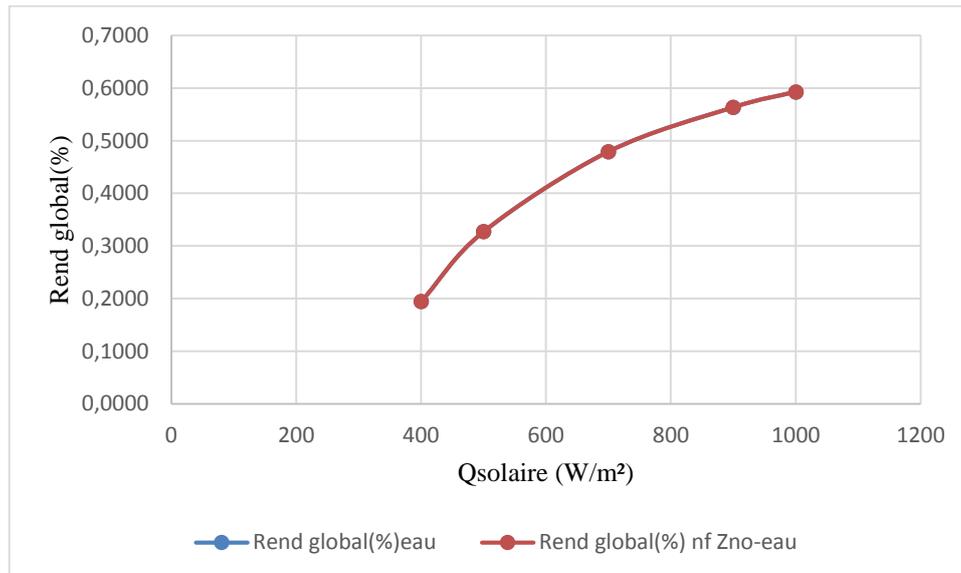


Figure 4- 10 : Effet du $Q_{solaire}$ sur le Rendement Global du PVT.

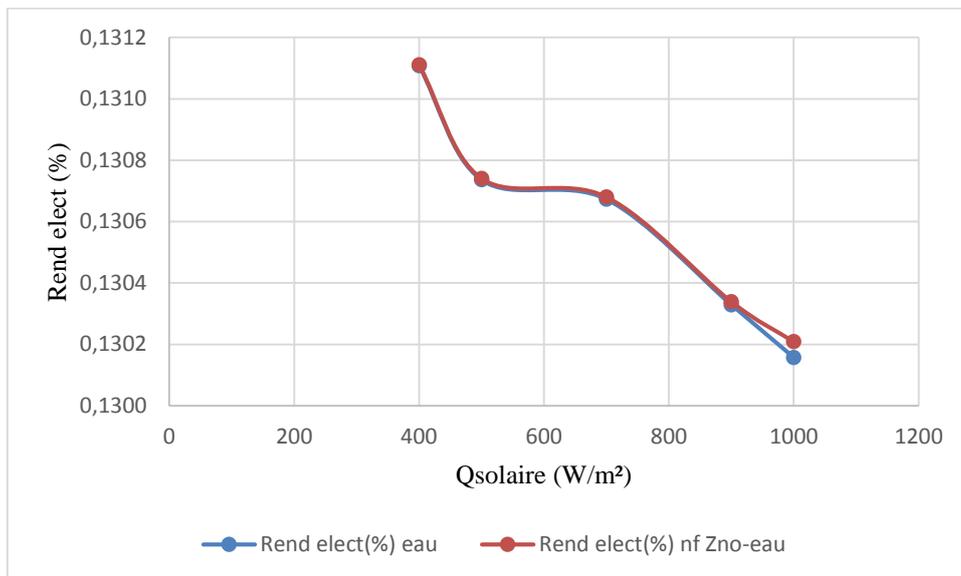


Figure 4- 11 : Effet du $Q_{solaire}$ sur le Rendement Electrique du PVT.

La même remarque peut être faite concernant l'effet du flux solaire incident sur les performances du PVT à eau et à nano-fluide ZnO-eau. Il faudra noter aussi que pour la figure VI-11 que la valeur de la température TPV ainsi que le rendement électrique correspondant à un flux solaire incident de 500 W/m^2 , les points obtenus dans ces deux courbes ne suivent pas la tendance, car il s'avère être une erreur de manipulation de fichier de données pour la température Tpv du capteur photovoltaïque ce qui a influer aussi sur la valeur du rendement électrique, par contre aucune incident sur les rendements thermique car n'entrant pas dans sa détermination. On remarquera cependant, que le rendement électrique diminue avec l'augmentation du rayonnement solaire incident, ce qui est nuisible pour les capteurs photovoltaïques installés dans les régions dites chaudes comme en Algérie.

4 -5. Effet de la Hauteur H du Canal de Refroidissement

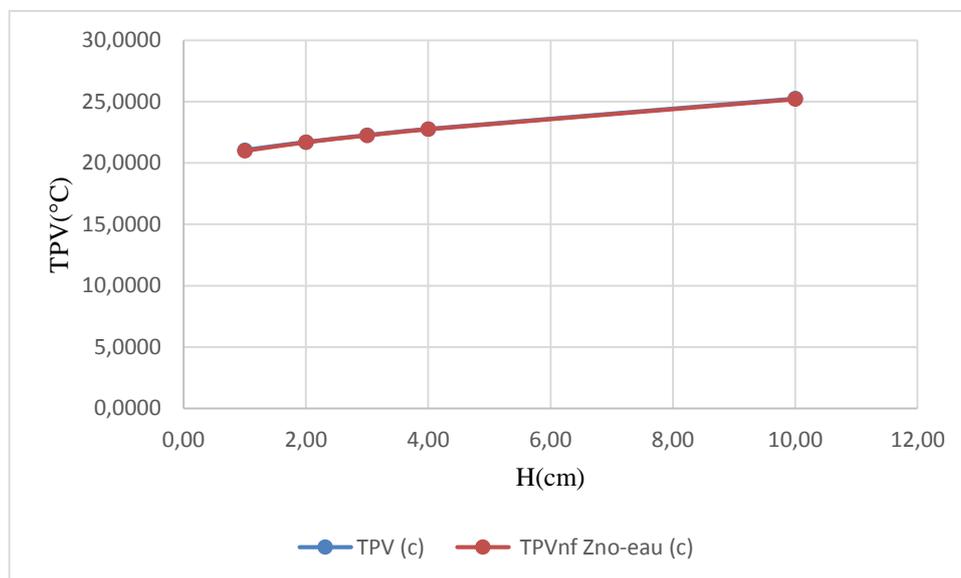


Figure 4- 12 : Effet de la Hauteur H du Canal sur la Température du Capteur PV.

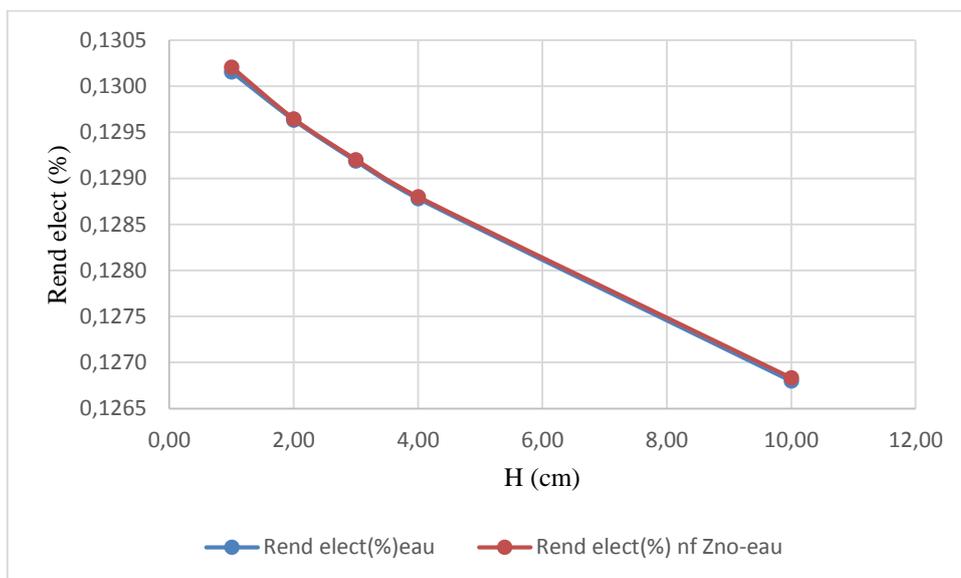


Figure 4- 13 : Effet de la Hauteur H du Canal sur le Rendement Electrique du PVT.

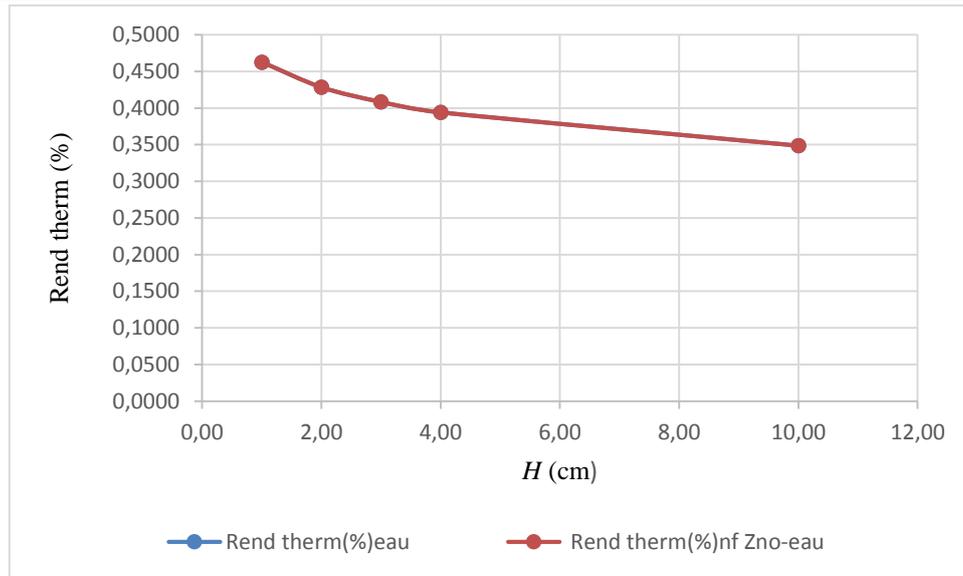


Figure 4- 14 : Effet de la Hauteur H du Canal sur le Rendement Thermique du PVT.

Si on augmente la valeur de la hauteur du canal de refroidissement de 1-cm jusqu'à 10-cm, on remarquera une diminution du rendement thermique de presque 10%, alors que le rendement électrique décroît que de presque 0.35 %. Ce fait explique tout à fait l'efficacité de la configuration adoptée dans le présent travail de master qui consiste à mettre le canal de refroidissement en dessus du PV et laisser passer ainsi le rayonnement visible du spectre solaire, ce qui comme conséquence d'accroître l'effet photovoltaïque quel que soit les conditions externes ou encore la géométrie et/ou les dimensions du canal. Aucune différence cependant dans les résultats obtenus n'existe, entre les PVT à eau et à nanofluide.

4 - 6. Effet de la Température Ambiante

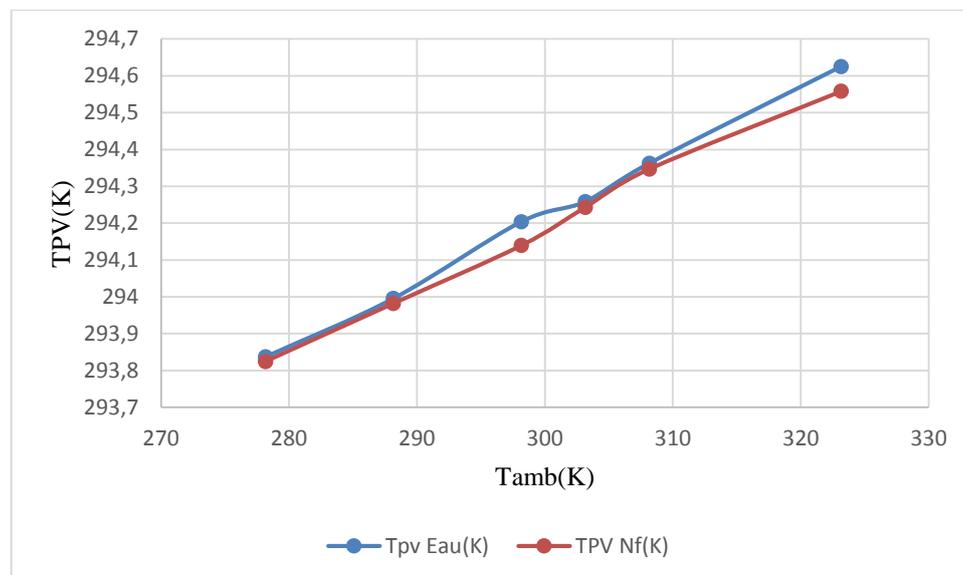


Figure 4- 15: Effet de la Température Ambiante sur la Température du Capteur PV.

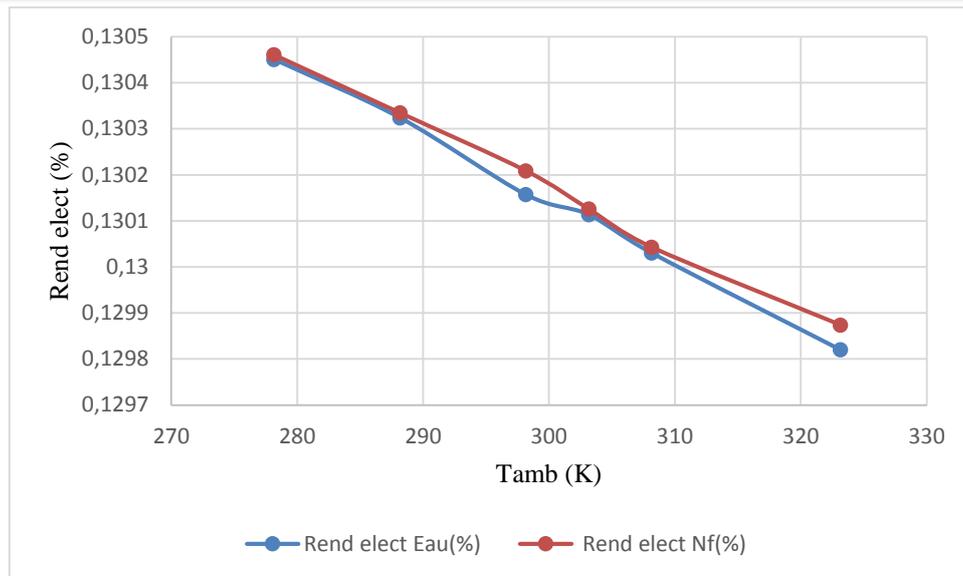


Figure 4- 16 : Effet de la Température Ambiante sur Le Rendement Electrique du PVT

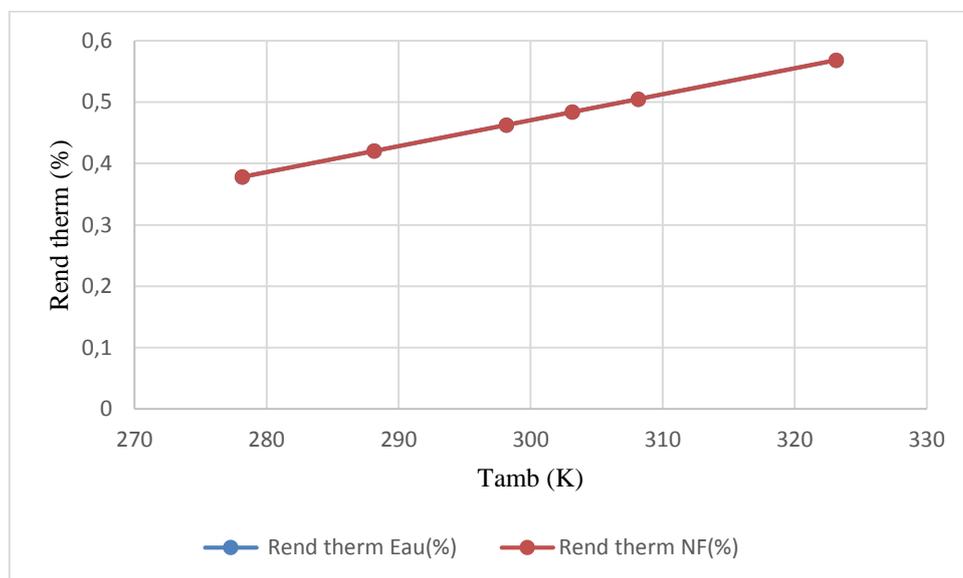


Figure 4- 17 : Effet de la Température Ambiante sur le Rendement Thermique du PVT

L'augmentation de la température ambiante entraîne une augmentation de la température des cellules PV, ainsi, le rendement électrique diminue comme prévue, par contre, en valeur absolue cela reste assez faible en comparaison avec les diminutions qu'on obtient généralement avec des capteur PV seuls, ou bien des PVT avec les configurations connues.

Entre 280 et 340 K, le capteur PVT gagne presque 20 % en efficacité, ce qui est considérable. Encore une fois, les résultats sont identiques pour l'eau et le nano-fluide ZnO-eau.

Afin de mieux rendre compte des différences existantes entre les capteurs hybrides PVT à eau et à nano-fluide ZnO-eau, on donne dans les tableaux (4.1 et 4.2, respectivement) ci-dessous quelques valeurs des différences (%) qu'on a trouvé par calcul. Les calculs ont été faits en utilisant la corrélation des mesures expérimentales de la conductivité thermique du nano-fluide. En conclusion, au moins concernant le nano-fluide ZnO-eau aucune différence n'existe avec l'eau comme fluide caloporteur de refroidissement.

Tentrée fluide/nano-fluide (°C)	TPV(°C) du PVT-Eau	TPV(°C) du PVT-Nano-fluide (ZnO-Eau)	(TPV _{eau} -TPV _{nf})/TPV _{eau} (%)
10	11,3030	11,296	0,0602
15	16,154	-	-
20	21,0537	20,989	0,306
25	25,902	25,885	0,0657
30	30,748	30,730	0,0608
35	35,593	35,574	0,0552

Tableau 4.1. Comparaison des Températures du Capteur Photovoltaïque (PV) pour des Capteurs Hybrides PVT à base d’Eau et Nano-fluide (Zno-Eau) pour différentes Températures d’entrée du fluide de Refroidissement.

Tamb (K)	TPV(K) du PVT-Eau	TPV(K) du PVT-Nano-fluide (ZnO-Eau)	(TPV _{eau} -TPV _{nf})/TPV _{eau} (%)
278,15	293,836	293,824	0,00427
288,15	293,995	293,981	0,00461
298,15	294,203	294,139	0,02195
303,15	294,258	294,242	0,00512
308,15	294,362	294,346	0,00529
323,15	294,625	294,557	0,02278

Tableau 4.2. Comparaison des Températures du Capteur Photovoltaïque (PV) pour des Capteurs Hybrides PVT à base d’Eau et Nanofluide (Zno-Eau) pour différentes Températures Ambiantes.

Comme indiqué au début de ce chapitre, on a comparé deux corrélations celle de Hamilton-Cross et celle de Brugemann afin de voir quelle est celle qui nous permet de prédire la conductivité thermique du nano-fluide ZnO-eau avec la plus grande précision possible. Le tableau ci-dessous montre clairement que la corrélation de Hamilton-Cross est la plus précise et donne les mêmes résultats que la corrélation des mesures expérimentales. D’après certains auteurs, la corrélation HC est meilleure lorsque les nanostructures sont de forme cylindrique (ou proche). Il se pourrait donc que la majorité des nanostructures présents dans l’échantillon utilisé par Ferrouillat *et al.* Soient proches des formes cylindriques ou nano-fils.

Modèle	T(K)	λ_{nf} Corrélation des Mesures Expérimentales (Ferrouillat <i>et al.</i>) (W/m·K)	λ_{nf} – Hamilton-Cross HC model (W/m·K)	λ_{nf} - Brugemann model (W/m·K)	Différence Mesures-HC (%)	Différence Mesures-Brugemann (%)
Sphère	293,232	0,598	0,601	0,753	-0,511	-26,018
Cylindre	293,232	0,605	0,627	0,753	-4,848	-26,018

Tableau 4-3. Comparaison des Prédictions de la Conductivité Thermique Effective du Nano-fluide ZnO-Eau (λ_{nf}) entre 3 Approches (une Expérimentale et deux autres Corrélations). La fraction volumétrique est égale à 0.93%. [57].

Références Bibliographiques

- [1] - **Hicham Kaidouchi** (Juin 2014) Thèse de Master-Département de Génie Mécanique-Université du 8 Mai 1945 Guelma-Algérie. Etude Théorique d'un Capteur Hybride Photovoltaïque/Thermique à Eau et à Air.
- [2] - **Mohamed Ould Sidi Ahmed** (Juin 2015) Thèse de Master-Département de Génie Mécanique-Université du 8 Mai 1945 Guelma-Algérie. Etude Théorique d'un Capteur Hybride Photovoltaïque/Thermique à Air.
- [3] - **Shailja Kandwal** (Juillet 2015) Master Thesis-Department of Mechanical Engineering-Thapar University, Patiala-India. An Experimental Investigation into Nanofluids (CuO-H₂O & CuO-Ethylene glycol) Based Parabolic Solar Collector.
- [4] - **Z. Said, M.A. Sabiha, R. Saidur, A. Hepbasli, N.A. Rahim, S. Mekhilef, T.A. Ward.** Performance Enhancement of a Flat Plate Solar Collector Using Titanium dioxide Nanofluid and Polyethylene Glycol Dispersant. *Journal of Cleaner Production*, 92 (2015) pp. 343-353.
- [5] - **Mohammad Sardarabadi, Mohammad Passandideh-Fard, Saeed Zeinali Heris.** Experimental Investigation of the Effects of Silica/Water Nanofluid on PV/T (Photovoltaic Thermal units). *Energy* 66 (2014) pp. 264-272.
- [6] - **Matin Ghadiri, Mohammad Sardarabadi, Mohammad Pasandideh-fard, Ali Jabari Moghadam.** Experimental Investigation of a PVT System Performance using Nano Ferrofluids. *Energy Conversion and Management* 103 (2015) PP. 468-476.
- [7] - **Gan Y, Qiao L.** Radiation-enhanced Evaporation of Ethanol Fuel Containing Suspended Metal Nanoparticles. *International Journal Heat Mass Transfer* 55 (2012) PP.5777-5782.
- [8] - **Luo Z, Wang C, Wei W, Xiao G, Ni M.** Performance Improvement of a Nano6fluid Solar Collector Based on Direct Absorption Collection (DAC) concepts. *International Journal Heat Mass Transfer* 75 (2014) PP.262-271.
- [9] - **Rahman MM, Mojumder S, Saha S, Mekhilef S, Saidur R.** Augmentation of Natural Convection Heat Transfer in Triangular Shape Solar Collector by Utilizing Water Based Nanofluids Having a Corrugated Bottom Wall. *International Communications Heat Mass Transfer* 50 (2014) PP.117-127.
- [10] - **Faizal M, Saidur R, Mekhilef S, Alim MA.** Energy, Economic and Environmental Analysis of Metal Oxides Nanofluid for Flat-Plate Solar Collector. *Energy Conversion and Management* 76 (2013) PP.162-168.

- [11] - **Parvin S, Nasrin R, Alim MA.** Heat transfer and Entropy Generation Through Nanofluid Filled Direct Absorption Solar Collector. *International Journal Heat Mass Transfer* 71(2014) PP.386–395.
- [12] - **Ladjevardi SM, Asnaghi A, Izadkhast PS, Kashani AH.** Applicability of Graphite Nanofluids in Direct Solar Energy Absorption. *Solar Energy* 94 (2013) PP.327–334.
- [13] - **Filho EPB, Mendoza OSH, Beicker CLL, Menezes A, Wen D.** Experimental Investigation of a Silver Nanoparticle-Based Direct Absorption Solar Thermal System. *Energy Conversion and Management* 84 (2014) PP.261–267.
- [14] - **Karami M, Akhavan Bahabadi MA, Delfani S, Ghozatloo A.** A New Application of Carbon Nanotubes Nanofluid as Working Fluid of Low-Temperature Direct Absorption Solar Collector. *Solar Energy Materials and Solar Cells* 121 (2014) PP114–118
- [15] - **Said Z, Saidur R, Rahim NA, Alim MA.** Analyses of Exergy Efficiency and Pumping Power for a Conventional flat Plate Solar Collector Using SWCNTS Based Nanofluid. *Energy and Buildings* 78 (2014) PP.1–9
- [16] - **Tang B, Wang Y, Qiu M, Zhang S.** A Full-Band Sunlight-Driven Carbon Nanotube/PEG/SiO₂ Composites For Solar Energy Storage. *Solar Energy Materials and Solar Cells* 123 (2014) PP.7–12.
- [17] - **Saidur R, Meng TC, Said Z, Hasanuzzaman M, Kamyar A.** Evaluation of the Effect of Nanofluid-based Absorbers on Direct Solar Collector. *International Journal Heat Mass Transfer* 55 (2012) pp. 5899–5907.
- [18] - **Sokhansefat T, Kasaeian AB, Kowsary F.** Heat Transfer Enhancement in Parabolic Trough Collector Tube using Al₂O₃/Synthetic Oil Nano-Fluid. *Renewable and Sustainable Energy Review* 33(2014) pp. 636–644.
- [19] - **Nasrin R, Parvin S, Alim MA.** Effect of Prandtl Number on Free Convection in a Solar Collector Filled with Nanofluid. *Procedia Engineering* 56 (2013) PP.54–62.
- [20] - **Colangelo G, Favale E, de-Risi A, Laforgia D.** Results of Experimental Investigations on the Heat Conductivity of Nanofluids Based on Diathermic Oil for High Temperature Applications. *Applied Energy* 97 (2012) PP. 828–833.
- [21] - **Hordy N, Rabilloud D, Meunier JL, Coulombe S.** High Temperature and Long-Term Stability of Carbon Nanotube Nanofluids for Direct Absorption Solar Thermal Collectors. *Solar Energy* 105 (2014) PP. 82–90.

- [22] - **Said Z, Sajid MH, Alim MA, Saidur R, Rahim NA.** Experimental Investigation of the Thermophysical Properties of Al₂O₃-Nanofluid and its Effect on a Flat Plate Solar Collector. *International Communications Heat Mass Transfer* 48 (2013) pp. 99–107.
- [23] - **Singh D, Timofeeva EV, Moravek MR, Cingarapu S, Yu W, Fischer T, Mathur S.** Use of Metallic Nanoparticles to Improve the Thermophysical properties of Organic Heat Transfer Fluids Used in Concentrated Solar Power. *Solar Energy* 105 (2014) PP.468–478.
- [24] - **Yousefi T, Veysi F, Shojaeizadeh E, Zinadini S.** An Experimental Investigation on the Effect of Al₂O₃-H₂O Nanofluid on the Efficiency of Flat-Plate Solar Collectors. *Renewable Energy* 39 (2012) pp. 293–298.
- [25] - **Yousefi, F. Veysy, E. Shojaeizadeh, S. Zinadini.** An Experimental Investigation on the Effect of MWCNT-H₂O Nanofluid on the Efficiency of Flat-Plate Solar Collectors. *Experimental Thermal and Fluid Science* (2012) pp. 207-212.
- [26] - **Lenert A, Wang E.** Optimization of Nano-Fluid Volumetric Receivers for Solar Thermal Energy Conversion. *Solar Energy* 86 (2012) pp.253–265.
- [27] - **B.C. Pak and Y.I. Cho.** Hydrodynamic and Heat Transfer Study of Dispersed Fluids with Submicron Metallic Oxide Particles. *Experimental Heat Transfer*, 11(1998) pp.151–170.
- [28] - **Y. Xuan and W. Roetzel.** Conception for Heat Transfer Correlation of Nano-fluids. *International Journal of Heat and Mass Transfer* 43(2000) pp.3701–3707.
- [29] - **A. Einstein.** Investigations on the Theory of the Brownian Movement. *Dover Publications*, New York, (1956).
- [30] - **H.C. Brinkman.** The Viscosity of Concentrated Suspensions and Solution. *J. Chem. Phys*, 20 1952) pp.571–581.
- [31] - **R.L. Hamilton and O.K. Crosser.** Thermal Conductivity of Heterogeneous two Component Systems. *Industrial and Engineering Chemistry Fundamentals* 1(1962) pp.187-191.
- [32] - **Y. Xuan and Q. Li.** Heat Transfer Enhancement of Nano-fluide. *International Journal of Heat fluid flow* 21 (2000) pp.58–64.

Références Bibliographiques

- [33] - **S. Lee, S.U.S. Choi, S. Li, and J.A. Eastman.** Measuring Thermal Conductivity of Fluids Containing Oxide Nanoparticles. *ASME J. Heat Transfer* 121 (1999) pp. 280-289.
- [34] - **D.P.H. Hasselman, and L.F. Johnson.** Effective Thermal Conductivity of Composites Interfacial Thermal Barrier Resistance. *Journal of composite Materials*, 21(1987) PP.508-515.
- [35] - **O.M. Wilson, X.Y. Hu, D.G. Cahill, and P.V. Braun.** Colloidal Metal Particles as Probes of Nanoscale Thermal Transport in Fluids. *Physical Review B*, 66(2002).
- [36] - **D.A.G. Bruggeman.** *Ann. Physics (Leipzig)* 24 (1935) pp. 636.
- [37]- **Hadi Hezaveh .Mostaf Keshavarz Moraveji.** Modeling Effective Thermal Conductivity of Nanoparticles in Water and Ethylene Glycol Based on Shape Factor. *International Journal of Chemical Engineering and Applications*, Vol. 2, No. 1, February 2011 ISSN: 2010-0221
- [38....52]- **Sezer O zerinc, Sadık Kakac ,Almila Gu venci,Yazıcıoğlu.** Enhanced Thermal Conductivity of Nanofluids: a State-of-the-Art Review. *Microfluid Nanofluid* (2010) 8 PP 145–170.
- [53]- Nano-fluid-based optical filter optimization for PV/T systems, Robert A Taylor, Todd Otanicar and Gary Rosengarten, *Nature Light: Science & Applications* (2012)
- [54]-**Zondag, H. A., De Vries D.W., Van Helden W.G.J., Van Zolingen R.J.C. and Van Steenhoven A.A.** (2002), The thermal and electrical yield of a PV-Thermal collector. *Solar Energy* 72, pp. 113-128)
- [55] -**R.K Shah and A. London** Laminar Flow Forced Convection Heat Transfert and Flow Friction in Straight and Curved Ducts a Summary of Analytical Solutions. *Office of Naval Research* .75 (1972) PP 99-100.
- [56]- **Ernst Schmidt.** Properties of Water and Steam in SI-Units. *Springer, Verlag Berlin Heidelberg New York, R. Oldenburg München.* 1969.
- [57]-**S. Ferrouillat et al.**(*International Journal of Mechanical and Industrial Engineering* (IJMIE), ISSN No. 2231 –6477, Volume-1, Issue-2, 2011).
- [58]-**P. Chantrenne et C. Ould Lahoucine** (Prediction of the Thermal Conductivity of ZnO Nanostructures), *ASME Journal of Heat Transfer*, 042401-2, Vol. 134, April 2012.

Références Bibliographiques

Liste des figures

Chapitre I :

Figure 1- 1: Principe de Conversion de l'Energie Solaire.....	3
Figure 1- 2: Coupe d'un module photovoltaïque	4
Figure 1- 3: L'Evolution de la Puissance Délivrée par un Ensemble de Modules PV en Fonction de la Température.....	5
Figure 1- 4: Capteur Solaire Classique.	6
Figure 1- 5: La Configuration Etudiée par H.Kaidouchi (Master, Juin 2014, Université 8 Mai 1945 de Guelma)	8
Figure 1- 6: La Configuration Etudiée par Mohammed Ould Sid Ahmed (Master Juin 2015-Université 8 Mai 1945 de Guelma).....	8
Figure 1- 7: (A) Schéma du collecteur de forme triangulaire (b) vue en 3D d'un capteur solaire thermique rempli de nanofluide [9].....	10
Figure 1- 8: Pourcentage de réduction de la taille de capteur solaire en appliquant différent nano-fluides.	11
Figure 1- 9: Rendement de Collecteur (η), la production d'entropie moyenne (S) et le nombre Bejan (Be) à différentes concentrations.....	12
Figure 1- 10: Schéma du capteur solaire volumétrique.....	13
Figure 1- 11: Système Expérimental : (a) une Représentation Schématique et (b) une Capture du Système sous Lumière Directe du Soleil au-dessus d'un Toit.	14
Figure 1- 12: Comparaison du Rapport de l'Energie Thermique Stockée à Différentes Concentrations (où b et u se Réfèrent à des Thermocouples Situés dans le bas et des Positions en haut, Respectivement).	15
Figure 1- 13: Taux d'Absorption Spécifique des Nanoparticules d'Argent (où b et u se Réfèrent à des Thermocouples Situés dans le bas et des Positions Supérieure Respectivement).....	15
Figure 1- 14: Conductivité Thermique du Nano-fluide f-CNT / eau à la Température Ambiante et à 60 ° C.....	16
Figure 1- 15: Changement de la Génération d'Entropie avec la Fraction Volumique.....	17
Figure 1- 16: Schéma du Cylindro-Parabolique et un Tube Absorbant.	18
Figure 1- 17: Coefficient moyen de transfert de chaleur par convection en fonction de la concentration des particules à des températures de fonctionnement 300, 400, et 500K.	18
Figure 1- 18: Schéma de principe du capteur solaire.	19
Figure 1- 19: Conductivité thermique nano-fluides : (a) Al ₂ O ₃ / EG et (b) Al ₂ O ₃ / eau à différentes fractions volumiques et à 25 ° C.....	20

Liste des figures

Chapitre II :

Figure 2- 1: Valeur De $(C_p)_{Nf}/(C_p)_F$ En Fonction De Φ Pour Le Nano-Fluide (Al ₂ O ₃ +Eau) Obtenues A Partir Des Deux Relations Donnant La Chaleur Spécifique Du Nano-Fluide.....	24
Figure 2- 2: Valeur De $(C_p)_{Nf}/(C_p)_F$ En Fonction De Φ Pour Le Nano-Fluide (CuO+Eau).....	24
Figure 2- 3: Valeur De $(C_p)_{Nf}/(C_p)_F$ En Fonction De Φ Pour Le Nano-Fluide (Cu+Eau).....	24
Figure 2- 4: Valeur De $(C_p)_{Nf}/(C_p)_F$ En Fonction De Φ Pour Le Nano-Fluide (Au+Eau).....	25
Figure 2- 5: Valeur De $(C_p)_{Nf}/(C_p)_F$ En Fonction De Φ Pour Le Nano-Fluide (Ag+Eau).....	25
Figure 2- 6: Graphe Donnant $T(R, T)-T_0$ En Fonction Du Logarithme De La Température En Un Point Du Fluide.....	28
Figure 2- 7: Image Micrographique Par Met Des Nanoparticules De Al ₂ O ₃ Dispersé Dans L'eau	35
Figure 2- 8: Présentation De La Distribution De La Taille Des Nanoparticule D'Al ₂ O ₃	36
Figure 2- 9: Image MEB Des Nanoparticules Al ₂ O ₃ Et CuO Et Zno Et CNT.....	36

Chapitre III :

Figure 3- 1: Composition d'un spectre électromagnétique.....	38
Figure 3- 2: Paquet d'Onde	39
Figure 3- 3: Pénétration de la Lumière dans l'Eau	39
Figure 3- 4: Absorption de la lumière par l'eau	40
Figure 3- 5 : Absorption de la lumière par les cellules de silicium.....	41
Figure 3- 6: Schéma de Capteur PV/T Classique.....	41
Figure 3- 7: Schéma du Capteur PV/T Proposé	42
Figure 3- 8: Bilan total du Capteur Hybride PV/T Proposé à Base de Nano-fluide.....	44
Figure 3- 9: Bilan d'Energie sur un Volume de Contrôle.....	44
Figure 3- 10: Spécification de deux flux de chaleur différents pour des plaques planes et parallèles.....	47
Figure 3- 11: Les Flux de Chaleur Dans la Vitre de Protection.....	47
Figure 3- 12: Le flux de chaleur sur la plaque PV	48
Figure 3- 13: Organigramme du Programme de Calcul.....	55

Liste des figures

Chapitre VI :

Figure 4- 1: Mesures Expérimentales de la Viscosité Dynamique du nano-fluide ZnO-eau	57
Figure 4- 2: (a) TEM image des nanoparticules du ZnO de forme nanotube (Evonik®).....	58
Figure 4- 3: Mesures Expérimentales de la Conductivité Thermique Effective du nanofluide ZnO-Eau et de l'Eau Pure	58
Figure 4- 4: Conductivité Thermique des Nanostructures ZnO en fonction de la longueur (nm).....	59
Figure 4- 5: Effet du Nombre de Reynolds sur la Température de la Cellule PV.	59
Figure 4- 6: Effet du Nombre de Reynolds sur le Rendement Electrique du PVT.	60
Figure 4- 8 : Effet du Nombre de Reynolds sur le Rendement Global du PVT.	61
Figure 4- 9 : Effet du Qsolaire sur le Rendement Thermique du PVT.	61
Figure 4- 10 : Effet du Qsolaire sur le Rendement Global du PVT.	62
Figure 4- 11 : Effet du Qsolaire sur le Rendement Electrique du PVT.	62
Figure 4- 12 : Effet de la Hauteur H du Canal sur la Température du Capteur PV.....	63
Figure 4- 13 : Effet de la Hauteur H du Canal sur le Rendement Electrique du PVT.	63
Figure 4- 14 : Effet de la Hauteur H du Canal sur le Rendement Thermique du PVT.	64
Figure 4- 15: Effet de la Température Ambiante sur la Température du Capteur PV.....	64
PV.....	64
Figure 4- 16 : Effet de la Température Ambiante sur Le Rendement Electrique du PVT	65
Figure 4- 17 : Effet de la Température Ambiante sur le Rendement Thermique du PVT	65

Liste des tableaux

Tableau. 1.1 : Les fonctions et caractéristiques physiques de ces divers matériaux.....4.

Tableau 2-1 : des modèles pour l'estimation de la conductivité thermique de nano-fluides.....35.

Tableau 4.1 : Comparaison des Températures du Capteur Photovoltaïque (PV) pour des Capteurs Hybrides PVT à base d'Eau et Nano-fluide (Zno-Eau) pour différentes Températures d'entrée du fluide de Refroidissement.....66.

Tableau 4.2 : Comparaison des Températures du Capteur Photovoltaïque (PV) pour des Capteurs Hybrides PVT à base d'Eau et Nano-fluide (Zno-Eau) pour différentes Températures Ambiantes.....66.

Tableau 4-3 : Comparaison des Prédictions de la Conductivité Thermique Effective du Nano-fluide ZnO-Eau (λ_{nf}) entre 3 Approches (une Expérimentale et deux autres Corrélations). La fraction volumétrique est égale à 0.93%.....66.