



Revue sur les nanofluides et leurs applications dans le domaine de l'énergie solaire

Mohammed Bekhti ^{a,*}, Rachid Saim ^a

^a *Laboratoire d'Energétique et Thermique Appliquée (ETAP),*

Département de Génie Mécanique, Faculté de Technologie, Université Abou Bekr Belkaid, Tlemcen

B.P 230, Chetouane, Tlemcen, 13000, Algérie,

ARTICLE INFO

Article history:

Received 10 December 2020

Accepted 21 April 2021

Mots clés:

Nanofluide

Transfert de chaleur

Energie solaire

Particule

Propriétés thermo physiques

Keywords:

Nanofluid

Heat transfer

Solar energy

Particle

Thermo-physical properties

RESUME

Dans cet article, une analyse de l'intégration des nanofluides et leurs applications dans le domaine de l'énergie solaire a été abordée. Pratiquement, il existe plusieurs facteurs qui affectent les propriétés physiques des nanofluides. L'utilisation des nanofluides comme fluide absorbant est une approche efficace pour améliorer le transfert de chaleur dans les appareils à énergie solaire. L'objectif principal de cette revue est d'examiner et de catégoriser toutes les formules et corrélations existantes sur les propriétés physiques et les modèles physiques des nanofluides, y compris la conductivité thermique, la viscosité, la masse volumique et la chaleur spécifique, et de résumer les recherches menées ces dernières années sur les applications des nanofluides dans les systèmes d'énergie solaire. Cet article identifie également les opportunités de recherche future dans le domaine de l'énergie solaire.

ABSTRACT

In this article, an analysis of the integration of nanofluids and their applications in the field of solar energy has been discussed. Practically, several factors affect the physical properties of nanofluids. The use of nanofluids as an absorbent fluid is an effective approach to improve heat transfer in solar-powered devices. The main objective of this review is to examine and categorize all existing formulas and correlations on the physical properties and physical models of nanofluids, including thermal conductivity, viscosity, density, and specific heat, and to summarize the research carried out in recent years on the applications of nanofluids in solar energy systems. This article also identifies future research opportunities in the field of solar energy

* *Corresponding author, E-mail address: bekhtimohammed93@gmail.com*

Tel.: +213 792 39 32 41



1. Introduction

Les nanofluides sont produits en dispersant des particules solides à l'échelle nanométrique dans des liquides de base à faible conductivité thermique tels que l'eau, l'éthylène glycol (EG), les huiles, etc. Le contrôle du transfert de chaleur dans de nombreux systèmes énergétiques est crucial en raison de la hausse des prix de l'énergie. Ces dernières années, la technologie des nanofluides a été proposée et étudiée par certains chercheurs expérimentalement ou numériquement pour contrôler le transfert de chaleur dans un processus. Le nanofluide peut être appliqué à des problèmes d'ingénierie, tels que les échangeurs de chaleur, le refroidissement des équipements électroniques et les processus chimiques. Il existe deux façons de simuler un nanofluide : monophasé et biphasé. Dans la première méthode, les chercheurs ont supposé que les nanofluides devaient être traités comme le fluide pur commun et que des équations conventionnelles de masse, de quantité de mouvement et d'énergie sont utilisées et que le seul effet du nanofluide est sa conductivité thermique et sa viscosité qui sont obtenues à partir de modèles théoriques ou données expérimentales. Ces chercheurs ont supposé que les nanoparticules sont en équilibre thermique et qu'il n'y a pas de vitesses de glissement entre les nanoparticules et les molécules fluides, elles ont donc un mélange uniforme de nanoparticules. Dans la seconde méthode, les chercheurs ont supposé qu'il existe des vitesses de glissement entre les nanoparticules et les molécules de fluide. Ainsi, la fraction volumique de nanofluides ne pourrait plus être uniforme et il y aurait une concentration variable de nanoparticules dans un mélange. Il existe plusieurs méthodes numériques et semi-analytiques qui ont été utilisées par plusieurs auteurs pour simuler l'écoulement des nanofluides et le transfert de chaleur [1].

Les travaux antérieurs sur les applications des nanofluides à l'énergie solaire sont principalement liés à leur intégration dans les collecteurs. Pour cette raison, cette revue examine principalement l'effet des nanofluides sur l'amélioration de l'efficacité des capteurs solaires avec des considérations économiques et environnementales concernant l'utilisation de ces systèmes. D'autres applications des nanofluides dans les cellules solaires, le stockage d'énergie thermique et les alambics solaires sont également examinées.

Tout d'abord, l'application des nanofluides dans les collecteurs et les chauffe-eau est étudiée du point de vue de l'efficacité énergétique, économique et environnemental. Certaines revues se concentrent également sur les propriétés optiques et la conductivité thermique des nanofluides, car ces paramètres peuvent décider de la capacité des nanofluides à augmenter les performances des systèmes solaires [2].

Il existe différentes corrélations disponibles dans la littérature pour calculer les propriétés fondamentales des nanofluides. La plupart de ces équations concernent l'effet de la concentration volumique. Certaines de ces équations sont très anciennes et ont été établies bien avant l'apparition du terme nanofluide. La conductivité thermique, la viscosité, la masse volumique et la chaleur spécifique sont les principales propriétés thermophysiques requises pour calculer les performances d'un système thermique [3]. Par conséquent, les modèles les plus couramment utilisés et les corrélations liées à ces propriétés sont compilés ci-dessous. De plus, les applications des nanofluides dans différents systèmes d'énergie solaire augmentent de jour en jour. Cependant, de nombreux problèmes et défis sont confrontés aux chercheurs concernés tels que la divergence des résultats obtenus par différents chercheurs et la méconnaissance des mécanismes physiques des propriétés des nanofluides.

Dans ce papier, on présente en revue des études antérieures sur l'application des nanofluides dans les systèmes d'énergie solaire et les difficultés les plus rencontrées de l'utilisation des nanofluides dans les systèmes thermiques solaires.

2. Propriétés thermophysiques

Il existe différentes corrélations disponibles dans la littérature pour calculer les propriétés fondamentales des nanofluides. La plupart de ces équations concernent l'effet de la concentration volumique. Certaines de ces équations sont très anciennes et ont été établies bien avant l'apparition du terme nanofluide. La conductivité thermique, la viscosité, la densité et la chaleur spécifique sont les principales propriétés thermophysiques requises pour calculer les performances d'un système thermique (tableau 1) [3].

Tableau 1. Propriétés thermophysiques pour l'écoulement de nanofluides. [3]

| Propriétés thermophysiques | Théorique | Expérimental |
|----------------------------|--|---|
| Conductivité thermique | Maxwell model [14] $K_{nf} = \frac{K_p + 2K_f + 2\phi(K_p - K_f)}{K_p + 2K_f - \phi(K_p - K_f)} K_f$ Xuan et al [5] $K_{nf} = \frac{K_p + 2K_f + 2\phi(K_p - K_f)}{K_p + 2K_f - \phi(K_p - K_f)} K_f + \frac{\rho_p \phi C p_f}{2} \sqrt{\frac{2k_B T_{ave}}{3\pi d_p \mu_f}}$ | Maiga et al [4] $K_{nf} = (4.97\phi^2 + 2.72\phi + 1)K_f$ Ho et al [6] $K_{nf} = (19.672\phi^2 + 2.944\phi + 1)K_f$ |

| | | |
|-------------------------------------|---|--|
| | <p>Koo et Kleinstreuer [7]</p> $K_{nf} = K_{static} + K_{Brownian}$ $K_{static} = \left(1 + \frac{3 \left(\frac{K_p}{K_f} - 1 \right) \phi}{\left(\frac{K_p}{K_f} + 2 \right) \left(\frac{K_p}{K_f} - 1 \right) \phi} \right) K_f$ $K_{Brownian} = 5 * 10^4 \delta \phi (\rho C_p)_f \sqrt{\frac{k_B T}{d_p \rho_p}} f(T, \phi)$ | |
| Viscosité | <p>Einstein model [8]</p> $\mu_{nf} = \mu_f (1 + 2.5\phi)$ <p>Brinkman [10]</p> $\mu_{nf} = \mu_f (1 - \phi)^{-2.5}$ <p>Masoumi et al [12]</p> $\mu_{nf} = \mu_f + \frac{\rho_p}{72C} \left(\sqrt{\frac{18k_B T}{\pi \rho_p d_p}} \right) \left(\sqrt[3]{\frac{Cd}{\pi}} \right)$ $C = \frac{1}{\mu_f} [(-0.000001133d_p - 0.000002771)\phi + (0.00000009d_p - 0.000000393)]$ | <p>Singh et al [9]</p> $\mu_{nf} = \mu_f (1 + 10\phi)$ <p>Corcione [11]</p> $\mu_{nf} = \mu_f \frac{1}{1 - 34.87 \left(\frac{d_p}{d_f} \right)^{-0.3} \phi^{1.03}}$ <p>Rea et al [13]</p> $\mu_{nf}(\phi, T) = \mu_f(T) EXP[4.91\phi(0.2092 - \phi)]$ <p>Ho et al [6]</p> $\mu_{nf} = \mu_f (1 + 4.93\phi + 222.4\phi^2)$ |
| Densité | <p>La densité de nanofluides peut être calculée: [3]</p> $\rho_{nf} = \rho_f (1 - \phi) + \rho_p \phi$ | |
| La capacité thermique spécifique | <p>La capacité thermique spécifique du nanofluide peut être calculée: [3]</p> $Cp_{nf} = Cp_f (1 - \phi) + Cp_p \phi$ | |
| Coefficient de dilatation thermique | <p>La relation suivante est utilisée pour estimer le coefficient de dilatation thermique: [3]</p> $\beta_{nf} = \frac{(\rho\beta)_f (1 - \phi) + (\rho\beta)_p \phi}{\rho_{nf}}$ $\beta_{nf} = \beta_f (1 - \phi) + \beta_p \phi$ | |

3. Modèle physique pour le comportement thermo-hydraulique des nanofluides

Dans cette section, nous présentons les principaux modèles physiques utilisés pour décrire les caractéristiques d'écoulement et de transfert de chaleur des nanofluides. Nous commençons par présenter une revue sur les équations de transport pour les fluides conventionnels, y compris la continuité, les équations de Navier-Stokes et l'équation d'énergie, qui sont utilisées pour évaluer les champs de vitesse, de pression et de température dus au mouvement d'un fluide

conventionnel dans une arbitraire géométrie. Vient ensuite l'extension des lois de conservation aux écoulements de nanofluides. [3].

3.1. Équation de transport pour les fluides conventionnels [3]

L'équation de continuité:

$$\nabla(\rho_f V) = 0 \tag{1}$$

L'équation de mouvement :

$$\rho_f (V \cdot \nabla) V = -\nabla p + \nabla \cdot [\mu_f (\nabla V + \nabla V^T)] + \nabla \cdot [\lambda (\nabla \cdot V) I] + F \tag{2}$$

$$\rho_f (V \cdot \nabla) V = -\nabla p + \mu_f \nabla^2 V + F \tag{3}$$

L'équation énergie:

$$\nabla \cdot (\rho_f C p_f V T) = \nabla \cdot (k_f \nabla T) + \Phi \tag{4}$$

Φ est la fonction de dissipation visqueuse, qui résulte du travail effectué contre les forces visqueuses et pour un fluide visqueux incompressible newtonien et est donnée par :

$$\Phi = \mu_f \left\{ 2 \left[\left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial w}{\partial z} \right)^2 \right] + \left(\frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial w}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial z} \right)^2 + \left(\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial v}{\partial x} \right)^2 \right\} + \lambda (\nabla \cdot V)^2 \tag{5}$$

Tableau 2. Modèles physiques pour l'écoulement de nanofluides et le transfert de chaleur [3]

| Modèle physique pour l'écoulement de nanofluides | |
|--|---|
| Approches en une seule phase | Approches en deux phases |
| <p>Un nanofluide est par nature un fluide à deux phases (solide-liquide); cependant, pour les simulations numériques dans certaines conditions, certaines hypothèses appropriées peuvent être faites pour modéliser les nanofluides sous forme de fluides monophasés.</p> <p>Dans les modèles monophasés, les équations gouvernantes ne sont résolues que pour une phase liquide efficace. Les modèles monophasés peuvent être divisés</p> | <p>Eulerian-Euliriane</p> <p>Les modèles eulériens – eulériens (par exemple, les approches à deux phases) ne peuvent pas être affectés pour suivre la trajectoire des particules en suspension dans le fluide.</p> <p><i>Modèle de volume de fluide (VOF)</i></p> <p>L'équation de continuité:</p> $\nabla(\phi_q \rho_q V_q) = 0$ |

en trois approches principales, notamment les modèles homogènes, à dispersion thermique et de Buongiorno. Dans ce qui suit chaque modèle est décrit en détail.

➤ **Modèle homogène**

L'équation de continuité:

$$\nabla(\rho_{nf}V) = 0$$

L'équation de mouvement:

$$\rho_{nf}(V \cdot \nabla)V = -\nabla p + \mu_{nf}\nabla^2V + F$$

L'équation d'énergie

$$\nabla \cdot (\rho_{nf}Cp_{nf}VT) = \nabla \cdot (k_{nf}\nabla T) + \Phi$$

- Le modèle de dispersion thermique a été étudié par Xuan et Roetzel $V = \bar{V} + V'$

$$\bar{V} = \frac{1}{V_f} \int V dV$$

$$T = \bar{T} + T'$$

$$\bar{T} = \frac{1}{V_f} \int T dV$$

L'équation d'énergie:

$$\begin{aligned} \nabla(\rho_{nf}Cp_{nf}\bar{V}\bar{T}) &= \nabla(k_{nf}\nabla\bar{T}) \\ &- \nabla(\rho_{nf}Cp_{nf}\bar{V}'T') \end{aligned}$$

➤ **Model de Buongiorno**

L'équation de continuité:

$$\nabla(\rho_{nf}V) = 0$$

L'équation de mouvement:

$$\rho_{nf}(V \cdot \nabla)V = -\nabla p + [\mu_{nf}(\nabla V + \nabla V^T)]$$

L'équation d'énergé :

$$\begin{aligned} \nabla(\rho_{nf}Cp_{nf}VT) &= \nabla(k_{nf}\nabla T) \\ &+ (\rho Cp)_p [D_B \nabla \phi \cdot \nabla T \\ &+ D_T \frac{\nabla T \cdot \nabla T}{T} \end{aligned}$$

Équation de conservation des nanoparticules:

$$V \cdot \nabla \phi = \nabla \cdot (D_B \nabla \phi + \frac{D_T \nabla T}{T})$$

La diffusion brownienne et la thermophorèse (ou coefficient de diffusion thermique):

La somme des fractions volumiques des phases est de un, ou $\sum_{q=1}^n \phi_q = 1$

Modèle Mixte

L'équation de continuité: $\nabla \cdot (\rho_m V_m) = 0$

L'équation de mouvement:

$$\begin{aligned} \rho_m(V_m \cdot \nabla)V_m &= -\nabla p + \nabla \cdot [\mu_m(\nabla V_m + \nabla V_m^T)] \\ &+ \nabla \cdot \left(\sum_{k=1}^n \phi_k \rho_k V_{dr,k} V_{dr,k} \right) + F \end{aligned}$$

L'équation d'énergie:

$$\nabla \cdot \left(\sum_{k=1}^n \phi_k \rho_k Cp_k V_k T_k \right) = \nabla \cdot \left(\sum_{k=1}^n k_{eff} \nabla T_k \right)$$

Équation de fraction volumique pour une phase secondaire p :

$$\begin{aligned} \nabla(\phi_p \rho_p V_m) &= -\nabla \cdot (\phi_p \rho_p V_{dr,p}) \\ V_{dr,k} &= V_k - V_m \\ V_m &= \frac{\sum_{k=1}^n \phi_k \rho_k V_k}{\rho_m} \end{aligned}$$

Les autres propriétés du mélange telles que ρ_m , μ_m et k_{eff} pourraient être évaluées en utilisant les corrélations monophasées courantes.

$$\rho_m = \sum_{k=1}^n \phi_k \rho_k$$

$$\mu_m = \sum_{k=1}^n \phi_k \mu_k$$

$$k_{eff} = \sum_{k=1}^n \phi_k (k_k + k_t)$$

où k_t représente la conductivité thermique turbulente. l'équation est nécessaire pour trouver la vitesse de dérive:

$$V_{dr,p} = V_{pq} - \sum_{k=1}^n \frac{\phi_k \rho_k}{\rho_m} V_{qk}$$

V_{pq} la corrélation proposée par Manninen et al

$$V_{pq} = V_p - V_q = \frac{\tau_p}{f_{drag}} \frac{(\rho_p - \rho_m)}{\rho_p} a$$

$$\tau_p = \frac{\rho_p d_p^2}{18 \mu_q}$$

$$a = g - (V_m \cdot \nabla)V_m$$

Schiller et Naumann :

$$f_{drag} = \begin{cases} 1 + 0.15Re^{0.687} & Re \leq 1000 \\ 0.0183Re & Re > 1000 \end{cases}$$

| | |
|---|---|
| $D_B = \frac{k_B T}{3\pi\mu_{nf}d_p}$ $D_T = 0.26 \frac{k_{nf}}{2k_{nf} + k_p} \frac{\mu_{nf}}{\rho_{nf}} \phi$ <p>où k_B est la constante de Boltzmann.</p> | <p>Modèle Eulérien</p> <p>L'équation de continuité:</p> $\nabla(\phi_q \rho_q V_q) = 0$ <p>la somme de la fraction volumique de toutes les n phases est $\sum_{q=1}^n \phi_q = 1$</p> <p>L'équation de mouvement:</p> $\rho_q \phi_q (V_q \nabla) V_q = -\phi_q \nabla p + \nabla \cdot [\rho_q \phi_q (\nabla V_q + \nabla V_q^T)]$ $+ \sum_{p=1}^n R_{pq} + (F + F_L + F_{wl} + F_A)_q$ $R_{pq} = \sum_{p=1}^n K_{pq} (V_p - V_q)$ <p>dans laquelle, K_{pq} est le coefficient d'échange d'impulsion interphase.</p> $K_{pq} = \frac{3}{4} C_d \frac{\phi_p \phi_q \rho_q V_p - V_q }{d_p} \phi_q^{-2.65}$ <p>Le coefficient de traînée, C_d, est donné par:</p> $C_d = \frac{24 (1 + 0.15(\phi_q Re_p)^{0.678})}{\phi_q Re_p}$ <p>Ou $Re_p = \rho_q d_p V_p - V_q / \mu_q$</p> <p>L'équation d'énergie est donnée par:</p> $\nabla \cdot (\phi_q \rho_q C_{p,q} V_q T_q)$ $= \nabla(k_q \nabla T_q)$ $- [\mu_q \phi_q (\nabla V_q + \nabla V_q^T)] : \nabla V_q + \sum_{p=1}^n Q_{pq}$ <p>le coefficient d'échange thermique interphase. h_{pq} est le transfert de chaleur:</p> $Q_{pq} = h_{pq} (T_p - T_q)$ <p>Euler-lagrange</p> <p>L'équation de continuité:</p> $\nabla \cdot (\rho_f V_f) = 0$ <p>L'équation de mouvement:</p> $\rho_f (V_f \cdot \nabla) V_f = -\nabla p + \nabla \cdot [\mu_f (\nabla V_f + \nabla V_f^T)] S_m$ <p>Ou S_m est le terme source de mouvement</p> $S_m = \frac{1}{\delta V} \sum_{p=1}^{np} m_p F_p$ <p>L'équation d'énergie:</p> $\nabla \cdot (\rho_f C_{p,f} V_f T_f) = \nabla \cdot (k_f \nabla T_f) + S_e$ |
|---|---|

| | |
|--|---|
| | <p>S_e est le terme de source d'énergie</p> $S_e = \frac{1}{\delta V} \sum_{p=1}^{np} m_p C p_p \frac{dT_p}{dt}$ |
|--|---|

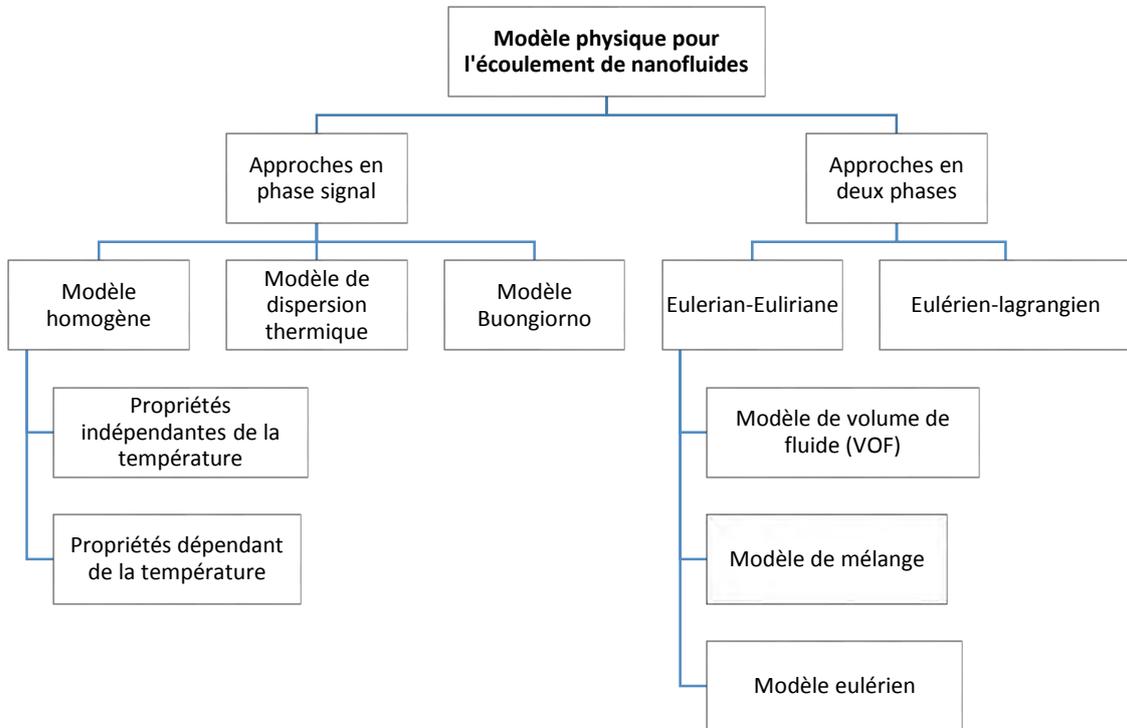


Fig. 1. Principales approches pour la modélisation des flux de nanofluides [3]

Tableau 2. Les propriétés thermo-physiques du nanofluide.

| | ρ (kg/m ³) | C_p (j/kgk) | k (W/m.k) | β (k ⁻¹) | σ ($\Omega.m^{-1}$) |
|---|-----------------------------|---------------|-------------|----------------------------|------------------------------|
| Eau pure | 997.1 | 4179 | 0.613 | 21×10^{-5} | 0.05 |
| Cuivre (Cu) | 8933 | 385 | 401 | 1.67×10^{-5} | |
| Argent (Ag) | 5.96×10^7 | 235 | 429 | 1.89×10^{-5} | |
| Alumine (Al ₂ O ₃) | 3970 | 765 | 40 | 0.85×10^{-5} | 1×10^{-10} |
| Oxyde de titane (TiO ₂) | 4250 | 686.2 | 8.9538 | 0.9×10^{-5} | 1×10^{-12} |

4. Applications des nanofluides dans le domaine de l'énergie solaire

A la base de la littérature récente, cette section explique les applications des nanofluides dans la conversion énergétique- solaire. Tout d'abord, les modifications récentes de différents types de capteurs solaires (CS), utilisant des nanofluides seront discutées. Les types de CS considérés

dans cette étude sont les capteurs solaires à plaque plate, à tube sous vide (ETSC), cylindriques et paraboliques. Ensuite, les applications des nanofluides dans les systèmes photovoltaïques / thermiques (PV/T), les dispositifs thermoélectriques solaires, les chauffe-eau solaires, le système de refroidissement et de production d'énergie solaire-géothermique (CCHP), le refroidissement par évaporation pour les serres et le dessalement de l'eau sont également abordés. [15].

4.1. Capteurs solaires (CS)

Un capteur solaire est un dispositif thermique utilisé pour collecter l'énergie solaire en absorbant la lumière du soleil et en la convertissant en énergie thermique [16-17-18]. La lumière du soleil est absorbée par un fluide de travail qui passe à travers les tuyaux du capteur solaire et par conséquent, elle est considérée comme l'élément le plus important du capteur solaire thermique. Le gain de chaleur utile du fluide de travail peut être donné par l'équation suivante [19] :

$$Q_u = \dot{m}.C_p(T_{out} - T_{in}) \quad (6)$$

Où Q_u est le gain de chaleur utile en (kj), \dot{m} est le débit massique du fluide de travail en (kg/s), C_p est la capacité thermique du fluide de travail à pression constante en (kj/kg k), T_{out} et T_{in} sont la température de sortie et d'entrée en (K).

L'efficacité thermique du capteur solaire est donnée par :

$$\eta = Q_u / (I_T A_C) \quad (7)$$

Où I_T est le rayonnement solaire incident (W/m^2), A_C est la surface du capteur solaire (m^2).

La chaleur spécifique du nanofluide utilisé comme fluide de travail est donnée par [14] :

$$C_{p_{nf}} = C_{p_f}(1 - \phi) + C_{p_p}\phi \quad (8)$$

Où $C_{p_{nf}}$, C_{p_p} et C_{p_f} sont respectivement la chaleur spécifique en (kj/kg.k) du nanofluide, des nanoparticules et du fluide de base, ϕ est la fraction volumique des nanoparticules dans le nanofluide (%), ρ_{nf} , ρ_p et ρ_f sont la densité en (kg/m^3) du nanofluide, des nanoparticules et du fluide de base, respectivement. La densité du nanofluide est donnée par [14] :

$$\rho_{nf} = \rho_f(1 - \phi) + \rho_p\phi \quad (9)$$

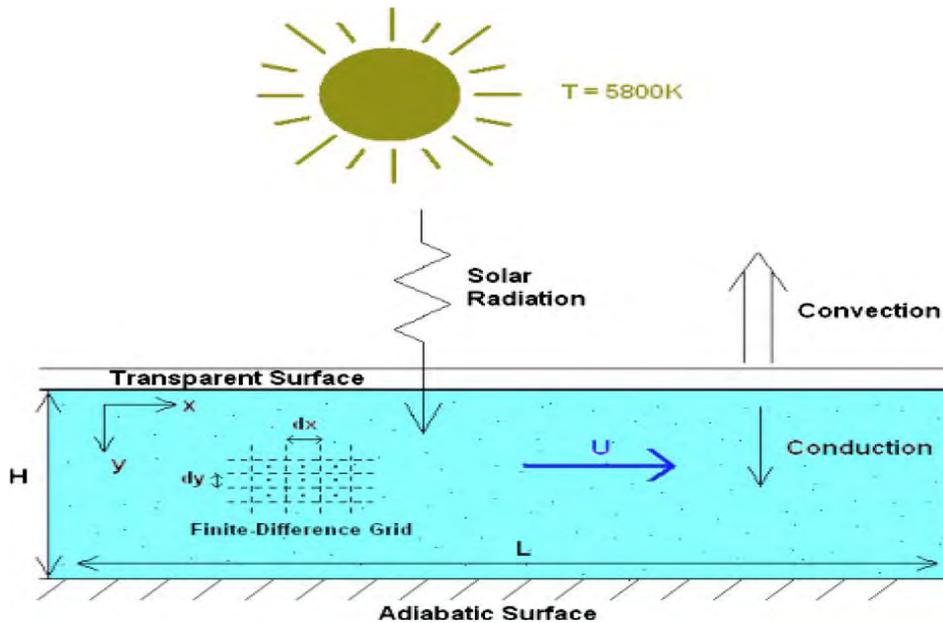


Fig. 2. Schéma du capteur solaire à absorption directe à base de nanofluides[20].

Comme le montre la figure 2, le fluide de travail est contenu dans un espace clos soumis uniquement au rayonnement solaire transmis. La surface inférieure étant parfaitement isolée et un verre transparent, qui laisse passer l'essentiel du rayonnement solaire incident, sert de couvercle pour la surface supérieure. La surface supérieure du couvercle en verre est exposée à l'air ambiant. Une petite quantité de rayonnement solaire est perdue par diffusion ou transmission à travers le couvercle en verre, la majeure partie est absorbée par les nanoparticules et convertie en chaleur utile, qui est transférée à une vitesse élevée au fluide de base, en raison de la conductivité thermique élevée et de la grande surface des nanoparticules. [15].

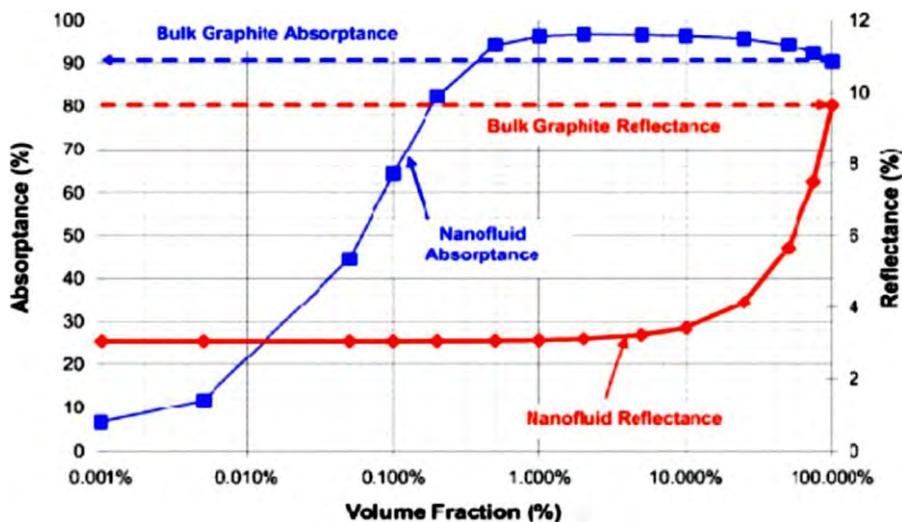


Fig. 3. Avantages de l'absorption volumétrique du nanofluide de graphite 30 nm par rapport à l'absorption surfacique conventionnelle [21].

Otanicar et al. [21] ont étudié le capteur solaire à absorption directe à l'aide de nanofluides fabriqués à partir de différentes nanoparticules, c'est-à-dire des nanotubes de carbone, du graphite et de l'argent.

Ils ont signalé une amélioration de l'efficacité du collecteur allant jusqu'à 5% en utilisant des nanofluides comme fluides de travail. Ils ont également signalé que l'utilisation de nanofluides comme milieu d'absorption volumétrique avait une réflectance réduite ainsi qu'une absorbance accrue par rapport à l'absorption en surface. (Fig. 3).

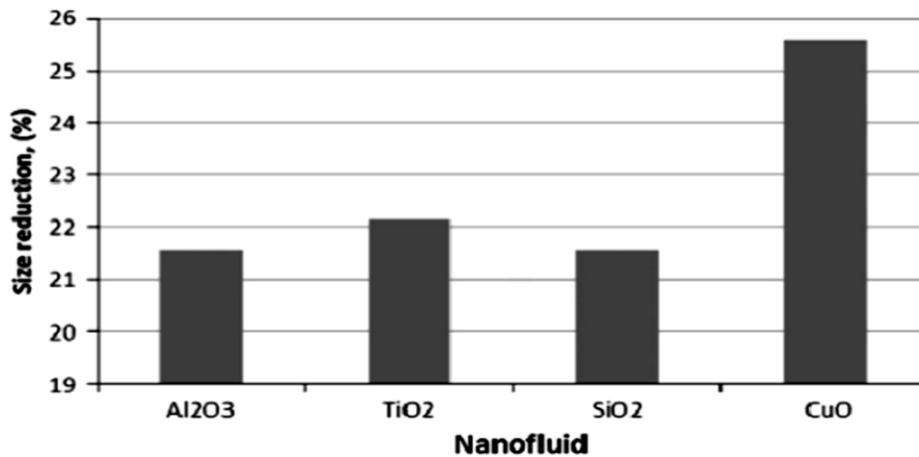


Fig. 4. Pourcentage de réduction de la taille du capteur solaire pour quatre types de nanofluides différents [22].

Faizal M et al. [22] ont étudié expérimentalement les performances thermiques d'un petit FPSC utilisant des nanofluides à base d'eau avec quatre types différents de nanoparticules de CuO, SiO₂, TiO₂ et Al₂O₃. Ils ont rapporté que: L'utilisation de nanoparticules avec une chaleur spécifique plus faible et une densité plus élevée améliore l'efficacité thermique. Par conséquent, parmi les quatre nanoparticules étudiées dans cette enquête, CuO est le choix optimal pour atteindre une efficacité maximale. La surface du CS est réduite de 25,6 %, 22,1 %, 21,6 % et 21,5 % pour CuO, TiO₂, SiO₂ et Al₂O₃, respectivement comme le montre la figure 4. Cette réduction de la taille du CS ne conduit pas seulement à une diminution des coûts de construction mais aussi une diminution des coûts d'exploitation (coût de l'électricité) [15].

4.2. Collecteurs à tubes sous vide

Kim et al. [23] ont étudié les effets de la concentration et de la taille des nanoparticules d'Al₂O₃ dispersées dans l'eau sur l'efficacité d'un U_{tube}CS (Fig 5). Les capteurs solaires à tubes sous vide présentent de nombreux avantages par rapport aux capteurs solaires plats conventionnels. De

nombreuses études comparatives ont été menées pour comparer les performances thermiques des deux types.



Fig. 5. Photographie de l'installation expérimentale du système de capteurs solaires à tube en U [23].

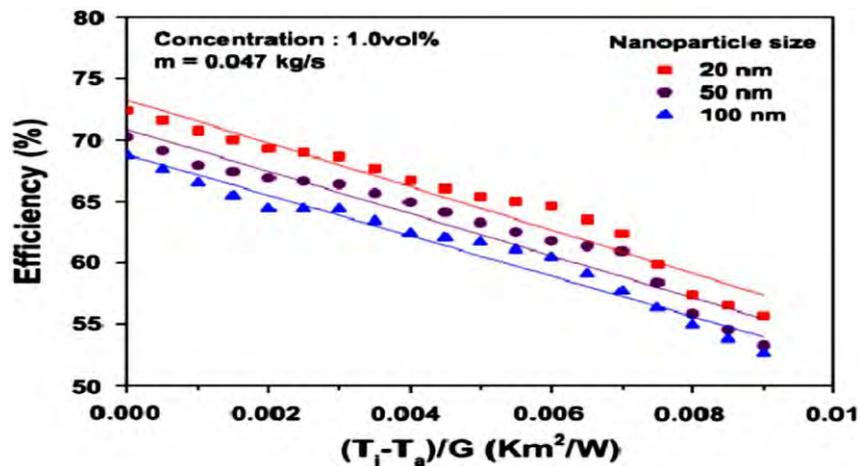


Fig. 6. Variation de l'efficacité du capteur solaire à tube en U en fonction de la taille des nanoparticules [23].

Kim et al. [23] a étudié les effets de la concentration et de la taille des nanoparticules d' Al_2O_3 dispersées dans l'eau sur l'efficacité d'un U_{tubeCS} , l'absorption de chaleur et le transfert de chaleur entre les nanoparticules ont diminué et donc l'efficacité du collecteur a diminué comme le montre la Fig.6. Une efficacité optimale de 24,1 % a été obtenue pour le collecteur utilisant nanofluide Al_2O_3 / d'eau avec une taille de nanoparticules de 20 nm et une fraction volumique de 1,0 % à un débit massique de 0,047 kg/s.

4.3. Capteurs solaires cylindriques

Badran et al [24] ont proposé deux cylindres concentriques avec un espace annulaire rempli d'eau ont été utilisés. Le rayonnement solaire absorbé par l'eau via la force motrice thermosiphonique, puis il est converti en chaleur utile.

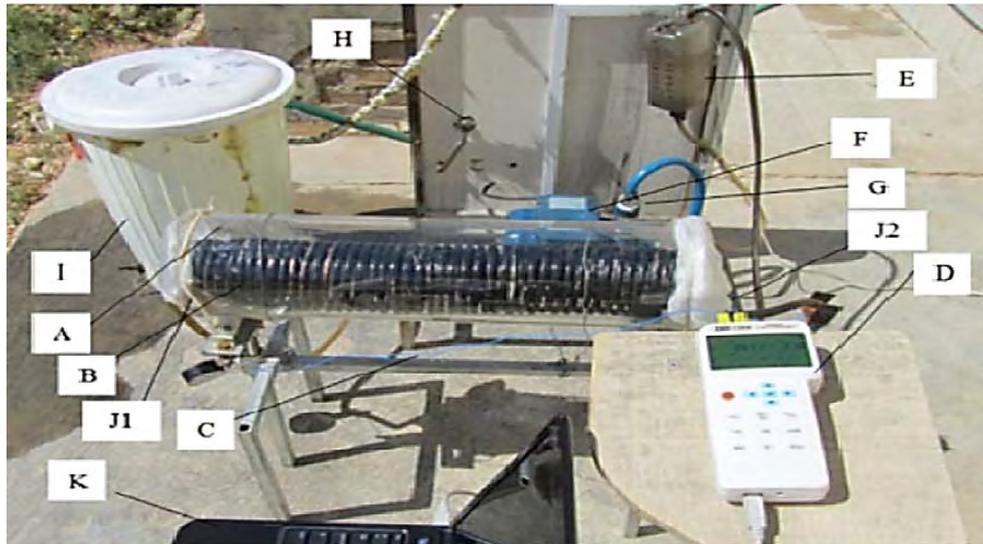


Fig. 7. Capteur solaire cylindrique. (A) verre cylindrique, (B) bobine de cuivre [25].

Goudarzi et al. [25] a évalué la performance thermique d'un CS cylindrique avec un tube récepteur hélicoïdal utilisant de l'eau et du nanofluide CuO/ H₂O comme fluides de travail Fig. 7. Les effets de la masse des nanoparticules, de la concentration (0,1 %, 0,2 % et 0,4 %), du débit massique du fluide (0,0083 et 0.033 kg/s) et l'application de dodécylsulfonates de sodium comme tensioactif sur l'efficacité thermique du collecteur ont été étudiés. Les résultats obtenus ont montré que l'utilisation de nanofluides CuO/H₂O (concentration de 0,1 % en poids et débit massique de 0,0083 kg/s) améliorerait le rendement thermique d'environ 25,6 % par rapport à cette eau pure. De plus, l'utilisation d'un tensioactif avec nanofluide améliore le rendement thermique d'environ 24,2 % par rapport à celui d'un nanofluide sans tensioactif.

4.4. Capteurs solaires paraboliques

Khullar et al. [26] ont étudié l'utilisation de capteur solaire à concentration parabolique (CSCP) à base de nanofluides pour améliorer le processus de récupération de l'énergie solaire (Fig. 8). Le capteur solaire à concentration parabolique à base de nanofluides proposé est similaire au CSCP conventionnel à l'exception du récepteur linéaire ou de l'élément collecteur de chaleur

du collecteur. La principale différence entre les deux types est que: dans le cas du CSCP, le nanofluide s'écoule dans un tube en verre au lieu du tube absorbeur conventionnel (Fig.9), de sorte qu'une interaction directe entre l'irradiation solaire et le fluide de travail se produit. Dans l'élément collecteur de chaleur conventionnel, le rayonnement solaire est d'abord absorbé par le tube absorbeur puis transféré via les modes de conduction et de convection au fluide de travail et il n'y a donc pas d'interaction directe entre l'irradiation solaire entrante et le fluide de travail. Cependant, dans le cas de l'utilisation de nanofluides, une interaction directe entre l'irradiation solaire entrante et le fluide de travail se produit. Ils ont développé le modèle mathématique du collecteur, puis ils ont résolu numériquement les équations gouvernantes. Les résultats théoriques ont été comparés aux résultats expérimentaux obtenus à partir d'expériences menées sur un capteur solaire à concentration parabolique conventionnel dans des conditions de fonctionnement similaires. La comparaison a montré que l'utilisation de nanofluides améliore l'efficacité du capteur solaire à concentration parabolique d'environ 5 à 10 % par rapport à celle conventionnelle. [15].

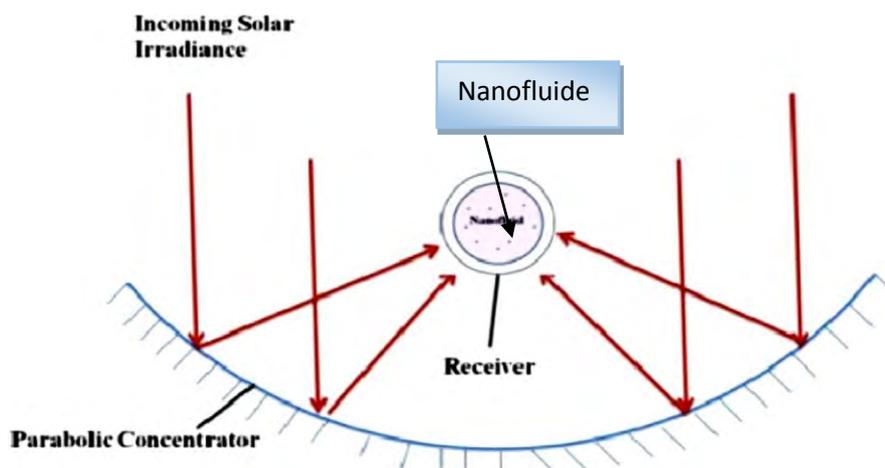


Fig. 8. Une coupe transversale d'un capteur solaire à concentration parabolique (CSCP) [26].

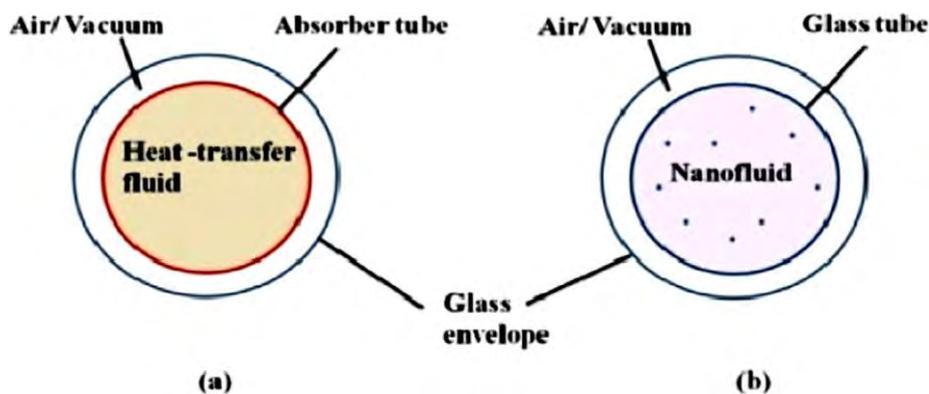


Fig. 9. Schéma (a) récepteur de chaleur CSCP conventionnel et (b) récepteur de chaleur CSCP à base de nanofluides [26]

4.5. Système photovoltaïque / thermique (PV/T)

Les dispositifs photovoltaïques / thermiques (PV/T) convertissent la lumière du soleil en énergie électrique et thermique (Figure 10). Ce processus est réalisé en combinant une cellule solaire, qui convertit la lumière du soleil directement en électricité à l'aide de semi-conducteurs, avec un capteur solaire thermique, qui absorbe l'énergie restante des cellules solaires. L'application de cette technologie aux cellules photovoltaïques conventionnelles a un effet significatif sur le rendement des cellules photovoltaïques, surmontant le principal inconvénient des cellules photovoltaïques qui est leur incapacité à absorber la lumière incidente du spectre solaire complet. Par conséquent, l'intégration des CS avec les cellules solaires utilise l'énergie solaire la plus incidente, et augmente ainsi les rendements électriques et thermiques globaux. [15].

Xu et al. [27] ont étudié les performances thermiques de cellules photovoltaïques densément compactées refroidies par un système de refroidissement à base de nanofluides Al_2O_3 /eau. De plus, un système hybride photovoltaïque à haute concentration (Fig. 11).

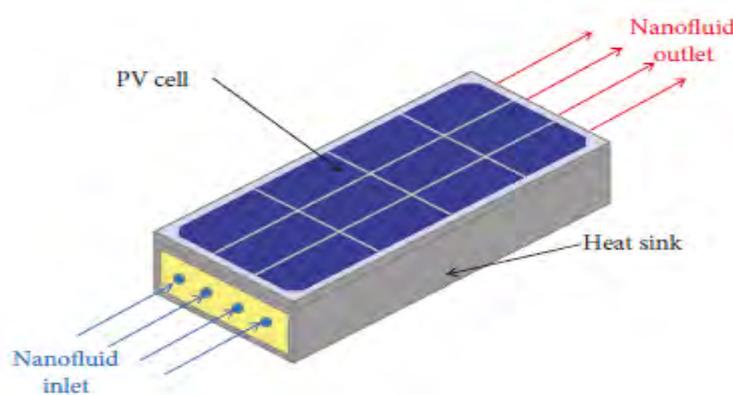


Fig.10. Schéma de principe du système solaire thermique photovoltaïque (PV / T) avec nanofluide comme moyen de refroidissement [28].

Xu et al. [29] ont proposé une nouvelle conception de système PV / T à double concentration qui peut fournir à la fois de l'énergie thermique et électrique avec une augmentation considérable de l'efficacité et une diminution du matériau des cellules solaires. Ils ont utilisé, pour la première fois, des nanoparticules diluées en suspension dans des fluides, pour améliorer l'efficacité d'un système PV/T. Les résultats ont montré qu'en utilisant un débit contrôlé pour atteindre la température de sortie du nanofluide à 331 K, l'efficacité globale du système

augmentait à 70 % avec des contributions thermiques et électriques s'élevant respectivement à 59 % et 11 %, comme indiqué dans Fig. 12.

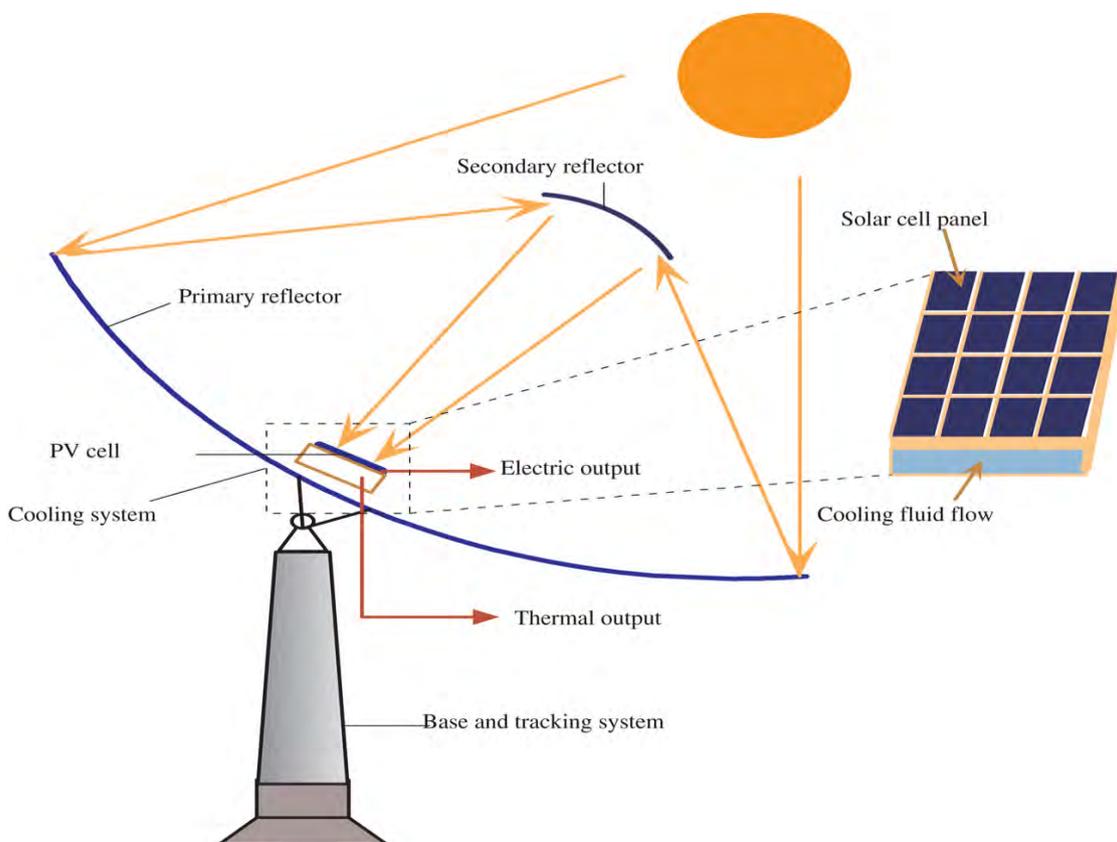


Fig. 11. (a) Modèle physique du récepteur photovoltaïque à haute concentration et du système de refroidissement. (b) Diagramme schématique d'un système photovoltaïque / thermique à concentration [27].

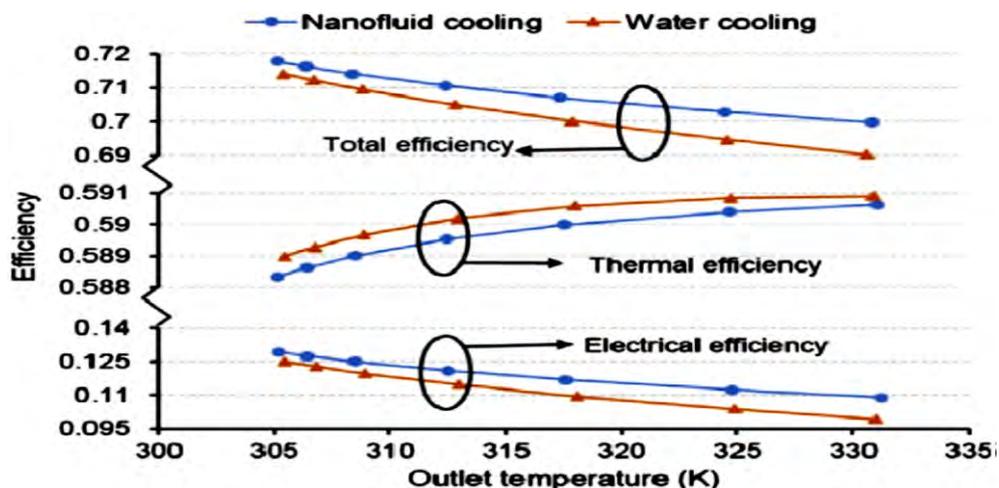


Fig. 12. Efficacité PV / T utilisant le refroidissement par eau et nanofluide pour cellule solaire en silicium [29].

4.6. Dispositifs thermoélectriques solaires

Les dispositifs thermoélectriques (TE) sont utilisés pour convertir l'énergie thermique directement en électricité et vice versa. Un circuit thermoélectrique est constitué de deux semi-conducteurs dissemblables, de type p et de type n, connectés thermiquement en parallèle et électriquement en série. L'une de ses extrémités est chauffée tandis que l'autre est maintenue à une température plus basse. Cette différence de température se traduit par une circulation d'électricité dans le circuit. De nombreux chercheurs ont étudié l'utilisation des appareils TE dans la conversion de l'énergie solaire, la climatisation des véhicules et le refroidissement électronique [15].

Ahmed et al. [30] ont étudié expérimentalement la faisabilité de l'utilisation de nanofluides dans le refroidissement TE d'un dispositif électronique. Le nanofluide Al_2O_3 /eau avec des concentrations volumiques variant entre 0,1 % et 0,2 % a été utilisé comme fluide de travail circulant dans un échangeur de chaleur à mini-canaux pour évacuer la chaleur du côté chaud du refroidisseur TE (Fig.13). Une augmentation de 9,15 % de la différence de température entre les côtés chaud et froid du thermoélectrique a été observée en utilisant des nanofluides (0,2 % en volume), et en conséquence la capacité de refroidissement du module a été améliorée.

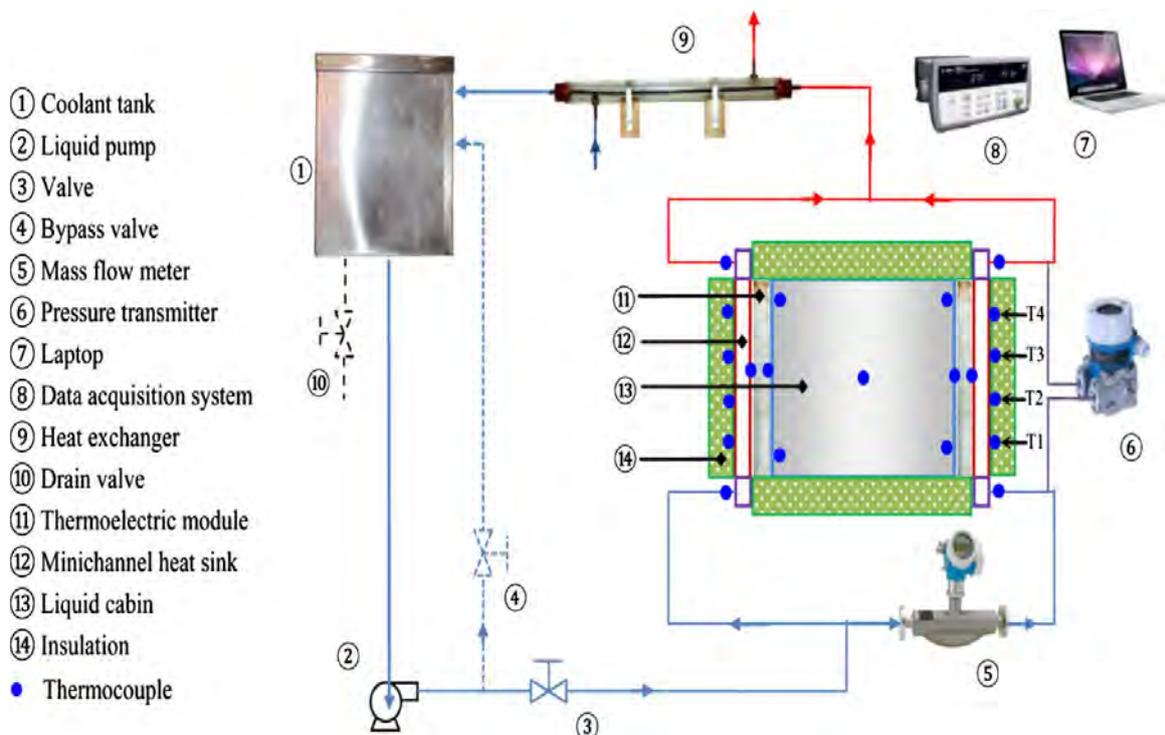


Fig. 13. Schéma de la configuration du refroidisseur thermoélectrique [30].

4.7. Chauffe-eau solaires

Le chauffage de l'eau à l'aide de chauffe-eau solaires à des fins domestiques est une technique simple et rentable d'utilisation du rayonnement solaire. Bien que son coût initial soit très élevé, il n'y a pas de coût d'exploitation supplémentaire. Il s'agit simplement de convertir le rayonnement solaire incident en chaleur, puis de le transmettre à l'eau comme milieu de transfert. De nombreux chercheurs ont étudié les performances thermiques des chauffe-eau solaires dans différentes conditions de fonctionnement et en utilisant divers capteurs solaires. L'une des méthodes les plus efficaces proposées pour améliorer les performances thermiques des chauffe-eau solaires est l'application de nanofluides dans les capteurs solaires, comme discuté dans la section précédente. [15].

Kabeel et al. [31] ont étudié les performances thermiques d'un chauffe-eau solaire constitué d'un échangeur de chaleur à serpentin hélicoïdal intégré avec un capteur solaire à plaques plates et un nanofluide Al_2O_3 /eau comme fluide de travail (Fig. 14). Ils ont rapporté que l'efficacité quotidienne du capteur solaire a été augmentée de 11 % en utilisant des nanoparticules avec une fraction volumique de 3 %. La température de l'eau de sortie a été augmentée de 5,46 % en utilisant des nanoparticules avec une fraction volumique de 2 %.

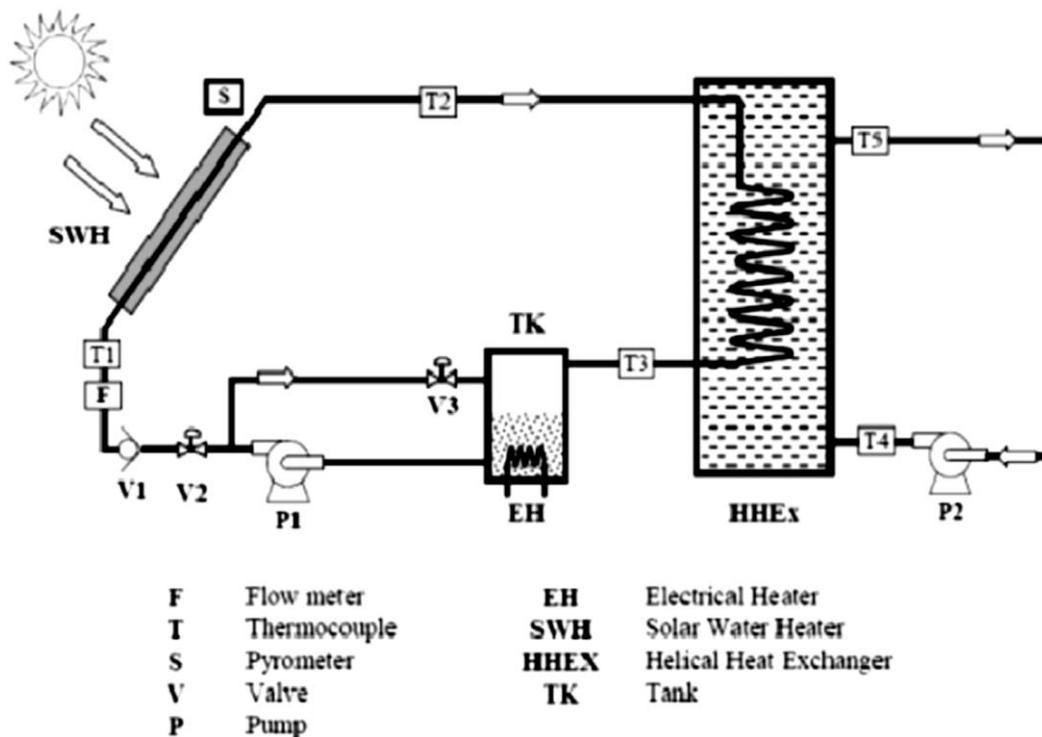


Fig. 14. Système de chauffe-eau solaire [31].

4.9. Refroidissement par évaporation pour les serres

Une serre est une structure avec des parois latérales et un toit en matériau transparent, tel que du verre, dans lequel les plantes sont cultivées en contrôlant et en régulant les conditions climatiques. En outre, la demande totale d'irrigation pour les cultures en serre est considérablement réduite. L'utilisation de coussinets de refroidissement par évaporation dans les serres pourrait même prolonger la saison de croissance des cultures à 10 mois par an. L'eau est le fluide couramment utilisé dans le refroidissement par évaporation. Le refroidissement par évaporation nécessite un environnement à faible humidité relative pour assurer l'échange d'énergie et de masse de l'air vers l'eau et vice versa. Le défi le plus important du refroidissement par évaporation est la présence d'une humidité relative ambiante élevée. Par conséquent, des échangeurs de chaleur sont utilisés pour contrôler les conditions ambiantes. L'efficacité de l'utilisation de la chaleur Les échangeurs dépendent des propriétés du fluide de travail telles que la conductivité, la chaleur spécifique, la viscosité et la densité, car ces propriétés ont un effet direct sur le processus de transfert de chaleur. Par conséquent, l'utilisation de nanofluides avec des propriétés thermo physiques améliorées peut être une méthode efficace pour améliorer les performances thermiques de l'échangeur de chaleur et de l'ensemble du système de refroidissement par évaporation. [15].

Abu-Hamdeh et al. [34] ont construit et testé un refroidissement par évaporation déshydratant à régénération solaire pour la production alimentaire en serre (Fig. 16). Ils ont étudié la faisabilité de l'utilisation de trois nanofluides différents, à savoir, ZnO / eau, Fe₃O₄ / eau et Al₂O₃ / eau, avec des concentrations volumiques variant de 0,01% à 0,04%. Les résultats ont montré que l'augmentation du débit d'air entraîne une diminution de la température de la serre de 6 °C lorsque le système de refroidissement par évaporation à desséchant est utilisé par rapport au refroidissement par évaporation traditionnel. Ils ont également signalé des améliorations du Coefficient de transfert de chaleur convectif de 5,50–9,01 %, 6,20–12,30% et 7,20–14,40 % de ZnO / eau, Fe₃O₄/eau et Al₂O₃/eau nanofluides, respectivement. Par conséquent, le nanofluide Al₂O₃/eau est le meilleur choix pour améliorer le Coefficient de transfert de chaleur au maximum. Cependant, pour obtenir la meilleure efficacité énergétique, ZnO/eau est le meilleur choix.

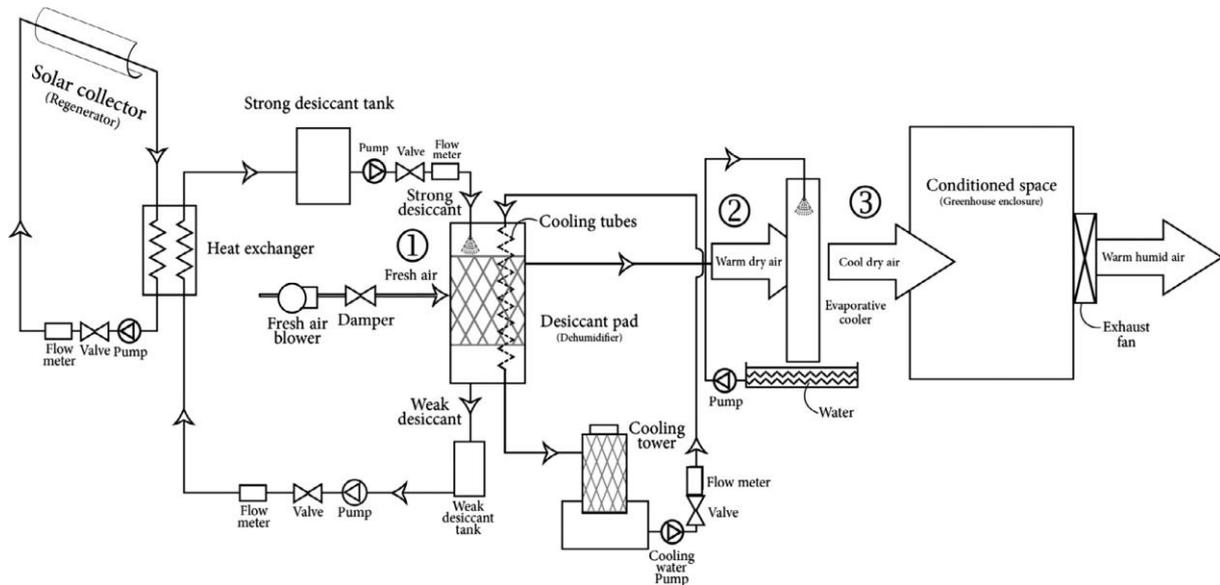


Fig. 16. Schéma de la serre refroidie par évaporation [34].

5. Conclusion

Des recherches théoriques et expérimentales ont été présentées pour comprendre les mécanismes des applications des nanofluides dans les systèmes d'énergie solaire (tels que les capteurs solaires, les cellules solaires et le dessalement de l'eau ...). Dans cet article, une revue et une synthèse sur les tendances récentes de notre étude a été abordée. Enfin, les remarques finales suivantes peuvent être déduites:

- Les propriétés thermophysiques et les modèles physiques des nanofluides se traduisent par une amélioration du processus de transfert de chaleur dans le domaine de l'énergie solaire.
- Les nanofluides peuvent être utilisés pour améliorer les performances de différents systèmes d'énergie solaire.
- La conductivité thermique des nanofluides est le facteur le plus important qui affecte les performances thermiques des systèmes d'énergie solaire, pour les meilleures performances, il est nécessaire d'augmenter la fraction volumique des nanoparticules.
- L'effet de la taille des nanoparticules sur les performances des capteurs solaires est d'augmenter la taille des nanoparticules pour augmenter les performances, des recherches plus expérimentales et théoriques sont nécessaires pour déterminer l'effet de la taille des particules.
- Amélioration du transfert de chaleur à l'aide de nanofluides dans différents systèmes solaires.

- les avantages économiques et environnementaux obtenus grâce à l'utilisation des nanofluides dans différents systèmes solaires.
- Les effets de différents types de nanofluides pour différentes applications solaires doivent être étudiés en particulier pour les applications à haute température.
- Utilisation de différents types de nanofluides avec des matériaux à changement de phase pour améliorer le stockage d'énergie.
- l'utilisation de nanoparticules en suspension dans des fluides de base dans les systèmes solaires à absorption directe pour améliorer l'absorption thermique solaire.
- les mécanismes de transfert thermique avec les nanofluides et ses effets sur l'efficacité thermique des différentes applications de l'énergie solaire et pour l'utilisation des nanofluides dans des applications réelles.
- L'utilisation de nanofluides hybrides dans l'application de l'énergie solaire devrait être explorée pour les travaux futurs.

6. References

- [1] Mahian O, Kolsi L, Amani M. Recent advances in modeling and simulation of nanofluid flows-Part I: Fundamental and theory, *Physics Reports* (2018), <https://doi.org/10.1016/j.physrep.2018.11.004>
- [2] Karankumar Mr, Chaudhari S. Applications of Nanofluid in Solar Energy– A Review, *International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT)*, March – 2014, ISSN: 2278-0181. Vol. 3 Issue 3,
- [3] Mahian O, Kolsi L, Amani M. Recent advances in modeling and simulation of nanofluid flows-Part I: Fundamental and theory, *Physics Reports* (2018), <https://doi.org/10.1016/j.physrep.2018.11.004>.
- [4] El Bécaye Maïga S, Palm S J, Nguyen C T, Roy G, Galanis N. Heat transfer enhancement by using nanofluids in forced convection flows, *Int. J. Heat Fluid Flow*. 26 (2005) 530–546. doi:10.1016/j.ijheatfluidflow.2005.02.004.
- [5] Xuan Y, Li Q, Hu W. Aggregation structure and thermal conductivity of nanofluids, *AIChE J.* 49 (2003) 1038–1043. doi:10.1002/aic.690490420.
- [6] Ho SK, Liu W K, Chang Y.S, Lin C.C. Natural convection heat transfer of alumina-water nanofluid in vertical square enclosures: An experimental study, *Int. J. Therm. Sci.* 49 (2010) 1345–1353. doi:10.1016/j.ijthermalsci.2010.02.013.

- [7] Koo J, Kleinstreuer C. A new thermal conductivity model for nanofluids, *J. Nanoparticle Res.* 6 (2004) 577–588. doi:10.1007/s11051-004-3170-5.
- [8] Khanafer K, Vafai K. A critical synthesis of thermophysical characteristics of nanofluids, *Int. J. Heat Mass Transf.* 54 (2011) 4410–4428. doi:10.1016/j.ijheatmasstransfer.2011.04.048.
- [9] Singh P K, Anoop K B, Sundararajan T, Das S K. Entropy generation due to flow and heat transfer in nanofluids, *Int. J. Heat Mass Transf.* 53 (2010) 4757–4767. doi:10.1016/j.ijheatmasstransfer.2010.06.016.
- [10] Birkman H.C. The viscosity of concentrated suspensions and solution, *J. Chem. Phys.* 20(1952) 571. doi:10.1063/1.1700493.
- [11] Corcione M. Heat transfer features of buoyancy-driven nanofluids inside rectangular enclosures differentially heated at the sidewalls, *Int. J. Therm. Sci.* 49 (2010) 1536–1546. doi:10.1016/j.ijthermalsci.2010.05.005.
- [12] Masoumi N, Sohrabi N, Behzadmehr A. A new model for calculating the effective viscosity of nanofluids, *J. Phys. D. Appl. Phys.* 42 (2009). doi:10.1088/0022-3727/42/5/055501.
- [13] Rea U, McKrell T, Wen Hu L, J. Buongiorno J. Laminar convective heat transfer and viscous pressure loss of alumina-water and zirconia-water nanofluids, *Int. J. Heat Mass Transf.* 52 (2009) 2042–2048. doi:10.1016/j.ijheatmasstransfer.2008.10.025.
- [14] Maxwell J C. A treatise on electricity and magnetism Vol. II, Oxford Clarendon Press. (1873) 360–366. Doi:10.1016/0016-0032(54)90053-8.
- [15] Elsheikh A.H, Sharshir S.W, Mohamed E. Mostafa, Essa F.A, Mohamed Kamal Ahmed Ali. Applications of nanofluids in solar energy: A review of recent advances, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 82 (2018) 3483–3502. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.10.108>.
- [16] Colangelo G, Favale E, Miglietta P, de Risi A, Milanese M, Laforgia D. Experimental of an innovative high concentration nanofluid solar collector. *Appl Energy* 2015, p.154:874–81. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.05.031>
- [17] Li Q, Zheng C, Shirazi A, BanyMousa O, Moscia F, Scott JA, et al. Design and analysis of a medium-temperature, concentrated solar thermal collector for air-conditioning applications. *Appl Energy* 2017, p.190:1159-73. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.01.040>
- [18] Mahesh A. Solar collectors and adsorption materials aspects of cooling system. *Renew Sustain Energy Rev* 2017, p.73:1300-12. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.01.144>

- [19] Kalogirou SA. Chapter four – performance of solar collectors. Solar energy engineering. Boston: Academic Press; 2009. p. 219-250.<https://doi.org/10.1016/B978-0-12-374501-9.00004-2>
- [20] Tyagi H, Phelan P, Prasher R. Predicted efficiency of a low-temperature nanofluid based direct absorption solar collector. *J Sol Energy Eng* 2009, p.131:041-004.<https://doi.org/10.1115/1.3197562>.
- [21] Otanicar TP, Phelan PE, Prasher RS, Rosengarten G, Taylor RA. Nanofluid-based direct absorption solar collector. *J Renew Sustain Energy* 2010, p.2:033-102.<https://doi.org/10.1063/1.3429737>
- [22] Faizal M, Saidur R, Mekhilef S, Alim MA. Energy, economic and environmental analysis of metal oxides nanofluid for flat-plate solar collector. *Energy Convers Manag* 2013, p.76:162-8.<https://doi.org/10.1016/j.enconman.2013.07.038>
- [23] Kim H, Kim J, Cho H. Experimental study on performance improvement of U-tube solar collector depending on nanoparticle size and concentration of Al₂O₃ nanofluid. *Energy* 2017, p.118:1304-12.<https://doi.org/10.1016/j.energy.2016.11.009>
- [24] Badran AA. Thermal performance of a cylindrical solar collector. *Energy Convers Manag* 1991, p.32:217-22.[https://doi.org/10.1016/0196-8904\(91\)90125-3](https://doi.org/10.1016/0196-8904(91)90125-3)
- [25] Goudarzi K, Shojaeizadeh E, Nejati F. An experimental investigation on the simultaneous effect of CuO–H₂O nanofluid and receiver helical pipe on the thermal efficiency of a cylindrical solar collector. *Appl Therm Eng* 2014, p.73:1236-43. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2014.07.067>
- [26] Khullar V, Tyagi H, Phelan PE, Otanicar TP, Singh H, Taylor RA. Solar energy harvesting using nanofluids-based concentrating solar collector. *J Nanotechnol Eng Med* 2013, p.3:031003-9.<https://doi.org/10.1115/MNHMT2012-75329>
- [27] Xu Z, Kleinstreuer C. Computational analysis of nanofluid cooling of high concentration photovoltaic cells. *J ThermSciEngAppl* 2014, p.6:031009-9. <https://doi.org/10.1115/1.4026355>
- [28] Asmaa A, Hasan B, Senthilarasu S, Tapas K M. Use of Nanofluids in Solar PV/Thermal Systems, *International Journal of Photoenergy*, Volume 2019, Article ID 8039129, 17 pages, <https://doi.org/10.1155/2019/8039129>
- [29] Xu Z, Kleinstreuer C. Concentration photovoltaic–thermal energy co-generation system using nanofluids for cooling and heating. *Energy Convers Manag* 2014, p.87:504-12. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2014.07.047>

- [30] Ahammed N, Asirvatham LG, Wongwises S. Thermoelectric cooling of electronic devices with nanofluid in a multiport minichannel heat exchanger. *ExpTherm Fluid Sci* 2016, p.74:81–90.<https://doi.org/10.1016/j.expthermflusci.2015.11.023>
- [31] Kabeel AE, El-Said EMS, Abdulaziz M. Thermal solar water heater with H₂O-Al₂O₃ nano-fluid in forced convection: experimental investigation. *Int J Ambient Energy* 2017, p.38:85–93.<https://doi.org/10.1080/01430750.2015.1041653>
- [32] Boyaghchi FA, Chavoshi M. Multi-criteria optimization of a micro solar-geothermal CCHP system applying water/CuO nanofluid based on exergy, exergoeconomic and exergoenvironmental concepts. *Appl Therm Eng* 2017, p.112:660-75. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2016.10.139>
- [33] Boyaghchi FA, Chavoshi M, Sabeti V. Optimization of a novel combined cooling, heating and power cycle driven by geothermal and solar energies using the water/ CuO (copper oxide) nanofluid. *Energy* 2015, p.91:685–99. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2015.08.082>
- [34] Abu-Hamdeh NH, Almitani KH. Solar liquid desiccant regeneration and nanofluids in evaporative cooling for greenhouse food production in Saudi Arabia. *Sol Energy* 2016, p.134:202–10.<https://doi.org/10.1016/j.solener.2016.04.048>