



République Algérienne Démocratique et Populaire  
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

N° :...

**Université 20 août 1955-Skikda**

Faculté des Sciences

Département de Physique

## **Mémoire de Master**

**Filière :** Physique

**Spécialité :** Physique énergétique et énergies renouvelables

**Thème**

---

**Modélisation et simulation numérique du comportement  
thermique d'un capteur solaire  
Hybride photovoltaïque thermique PVT à air**

---

Présenté par :  
**DJAREDDIR Kaoutar**

Soutenu le : 03/07/2023 devant le jury composé de :

S. LABIOD	MCB	Université de Skikda	Président
I.TABET	MCA	Université de Skikda	Rapporteur
K. KHLIFA	MRA	URAER Ghardaïa	Rapporteur
M.KAZZER	MCA	Université de Skikda	Examineur

Année Universitaire : 2022/2023

## Dédicace

Tous d'abord , louange Allah amon arrivée ici.

Merci aux parents, Ma mère, Mon père.

Ma deuxième petite famille Mon oncle et sa femme.

Tous mes frères et sœurs, merci ,la plus belle famille.

ma sœur aînée et sa petite famille.

A tous mes amis.

M.I Tabet, merci d'avoir accepté ce travail avec moi ,et merci  
pour

toute l'aide que vous m'avez apportée, Merci beaucoup.

## **Remerciements**

*Nous voulons tout d'abord saisir cette occasion pour exprimer notre profonde gratitude à notre encadreur, Monsieur **Tabet Ismail**, docteur à l'université de Skikda, et Monsieur **Khelifa Abdelkrim** maitre de recherche à l'unité de recherche appliquée en énergies renouvelables Ghardaïa pour avoir accepté de diriger notre travail expérimental à l'unité de recherche URAER. Pour avoir accepté de diriger nos travaux. Nous les remercions infiniment pour leurs présences, leurs conseils et leurs encouragements cela nous a permis de bénéficier de leurs expériences dans le domaine des énergies renouvelables. Et surtout dans le domaine des systèmes hybrides photovoltaïques thermiques.*

*Nous voulons remercier encore vivement :*

*Monsieur **Lebiouf Samir**, docteur à Université 20 août 1955 Skikda.*

*Monsieur **kezzar Mohamed**, docteur à Université 20 août 1955 Skikda.*

*De nous avoir fait l'honneur d'accepter de participer à notre jury de soutenance.*

**Sommaire**

**Remerciements**

**Dédicaces**

**Liste des figures**

## **Introduction générale**

### **Chapitre I : Etat de l'art sur les capteurs solaires**

I.1. Introduction.....	3
I.2.L'énergie solaire .....	3
I.3.Les capteurs solaires.....	4
I.3.1.Capteur solaire thermique.....	4
I.3.1.1.Principe .....	4
I.3.1.2.Différents types des capteurs solaires thermique.....	5
I.3.2.Le capteur solaire photovoltaïque .....	5
I.3.2.1.Différents types des capteurs solaires thermique .....	6
I.3.3.Les capteurs hybrides thermique photovoltaïque.....	7
I.3.3.1.Définition .....	7
I.3.3.2.Les différents types de capteurs hybrides PV/T .....	7
I.3.3.3.Domaine d'application des capteurs solaires hybrides PVT...	10
I.4.Conclusion.....	13

### **CHAPITRE II : Etude numérique et expérimentale**

II.1. Introduction.....	18
II.2. Les trois modes de transfert de chaleurs .....	18

II.2.1. Transfert de chaleur par Conduction.....	18
II.2.2. Transfert de chaleur par convection.....	19
II.2.3. Transfert de chaleur par rayonnement.....	20
II.3. Définition du problème physique et mathématique .....	21
II.3.1. Description de la nouvelle géométrie .....	21
II.3.2. Le modèle mathématique (Formulation).....	21
II.4. Les performances thermique et électrique du système hybride ...	23
II.5. Simulation numérique sous logiciel Ansys.....	24
II.5.2. Les étapes de simulation sous l'Ansys.....	24
II.6. Conclusion.....	32

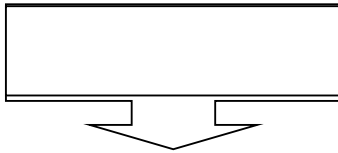
### **Chapitre III : Résultats et discussion**

III.1. Introduction.....	36
III.2. Résultats numériques.....	37
III.3 Conclusion .....	41
Conclusion Générale.....	42
Références bibliographiques.....	43

## Liste des figures

Figure I .1 Les procédés d'utilisation de l'énergie solaire.....	4
Figure I.1 : Capteur solaire thermique.....	5
Figure I.2 : Structure d'une cellule photovoltaïque utilisant.....	6
Figure I.9 : Classification des capteurs hybrides PV /T.....	8
Figure I.5 : Capteur solaire hybride PV/T à air.....	8
Figure I.6 : Capteur solaire hybride à eau.....	9
Figure I.7 : Capteurs hybride PVT à concentration.....	10
Figure II.1 : Schéma transfert de chaleur conductif.....	18
Figure II.2 : Schéma de transfert de chaleur convectif.....	20
Figure II.3 : Schéma de transfert de chaleur radiatif.....	20
Figure II.4 : La configuration du PVT à air.....	21
Figure II.5 : Géométrie du capteur PVT à air .....	23
Figure II.6 : Les différentes étapes nécessaires à une simulation sous Ansys.....	25
Figure II.7 : La géométrie sous Design Modeler.....	26
Figure II.8 : Maillage du capteur PVT.....	26
Figure II. 9 : Interface générale du projet sous Ansys-Fluent.....	28
Figure II.10 : Interface de modèle numérique sous Ansys-Fluent.....	29
Figure II.11 : Interface des propriétés des matériaux.....	29
Figure II.12 : Interface Conditions aux limites sous Ansys-Fluent.....	30
Figure II.13: Interface Valeurs de référence sous Ansys-Fluent.....	30
Figure II.14: Interface méthode de solution sous Ansys-Fluent.....	31
Figure II.15 : Interface Moniteur résiduel sous Ansys-Fluent.....	31

Figure II.16 : Interface résiduelle sous Ansys-Fluent.....	32
Figure III. 1 : Dimension du capteur solaire PVT à air.....	37
Figure III. 2 : Contours de température dans un plan.....	38
Figure III. 3 : Contours de vitesse dans un plan .....	38
Figure III.4 : Nusselt en fonction du débit massique.....	39
Figure III. 5 : Nusselt en fonction de la température PV.....	40
Figure III.6 : Température de sortie en fonction de température PV...	40



# ***Introduction générale***

## Introduction générale

Les énergies renouvelables sont des sources d'énergie qui utilisent des ressources naturelles considérées comme inépuisables : vent, soleil, marées, chutes d'eau, terre, végétaux...

Ces énergies ne produisent pas de gaz à effet de serre, de rejets polluants, et n'engendrent pas ou peu de déchets. Ils n'utilisent pas les ressources fossiles de la planète, comme le gaz naturel ou le pétrole [1]

Dans la majorité des applications, l'énergie solaire est utilisée pour produire séparément de l'énergie thermique et électrique au moyen des capteurs solaires thermiques et des modules photovoltaïques respectivement.

Le principal inconvénient des capteurs solaires est leur rendement de conversion. En effet, une grande partie de l'éclairement solaire ne se transforme pas en énergie (électrique ou thermique) à cause des pertes par réflexion et/ou par échauffement (augmentation de la température des cellules solaires). L'intégration des réflecteurs solaires permettent de réduire les pertes par réflexion et l'incorporation des échangeurs de chaleur sous les cellules permettent leur refroidissement et donc minimise les pertes thermiques [2].

Un capteur hybride photovoltaïque thermique est un capteur qui permet de produire de l'énergie thermique et électrique simultanément.

La performance des capteurs solaires hybrides photovoltaïque thermique reste toujours à besoin d'une amélioration, pour cette cela, beaucoup de recherche reste encore faire sur les capteurs solaires PV/T [3-5].

Dans ce travail nous avons fait une modélisation et simulation numérique du comportement thermique d'un capteur solaire hybride photovoltaïque thermique à air avec des ailettes

Notre travail est organisé en trois chapitres suivantes :

Le premier chapitre constitue une synthèse bibliographique à la fois technologique et scientifique abordant sur les capteurs solaire thermique.

Dans le second chapitre nous avons intéressé à la modélisation et simulation numérique du capteur hybride thermique photovoltaïque PV/T à air, nous avons utilisé le logiciel Ansys-fluent

Dans le troisième chapitre nous avons montré les différents résultats obtenus par la simulation numérique

Une conclusion générale qui récapitule l'interprétation des résultats obtenue termine ce travail.

**Chapitre I**

***États de l'art sur les capteurs  
solaires***

# Chapitre I :

## Etat de l'art sur les capteurs solaires

### I.1. Introduction

L'énergie renouvelable est une forme d'énergie qui est naturellement renouvelée et ne s'épuise pas à mesure qu'elle est utilisée. Les principales sources d'énergie renouvelable incluent l'énergie solaire, éolienne, hydraulique (hydroélectricité), biomasse, géothermique et les marées. Ces sources d'énergie sont considérées comme durables et respectueuses de l'environnement, car elles émettent moins de gaz à effet de serre que les combustibles fossiles, contribuant ainsi à réduire les impacts sur le changement climatique

Dans ce chapitre, nous nous intéressons à l'énergie solaire et à l'étude bibliographique sur les capteurs solaires : leur définition, leurs types et leurs domaines d'utilisation.

### I.2. L'énergie solaire :

La technologie solaire offre un grand potentiel en matière de fourniture des besoins énergétiques de la planète. Cependant, l'utilisation de cette énergie reste dans le monde est encore limitée. Le facteur principal est lié à coût initial élevé de la construction du système.

Les rayonnements solaires sont des rayonnements électromagnétiques émis par le soleil qui peut être captée et transformée en énergies utiles, telles que la chaleur et l'électricité, en utilisant une variété de technologies. Toutefois, la faisabilité technique et le fonctionnement économique de ces technologies à un endroit précis dépend de la ressource solaire disponible [2-4]. L'énergie solaire peut être utilisée par trois procédés technologiques suivants [7] ; Chimiques, électriques et thermiques (voir figure I.1).

- 1) Le Processus chimique grâce à la photosynthèse, maintient la vie sur la terre par la production d'aliments et convertir le CO<sub>2</sub> à O<sub>2</sub>.
- 2) Processus électrique, utilisant des convertisseurs photovoltaïques, fournit de

l'énergie pour les satellites et est utilisé dans de nombreuses applications terrestres.

3) Procédé thermique peut être utilisée pour fournir une grande partie de l'énergie thermique nécessaire pour le chauffage solaire de l'eau et le chauffage du bâtiment.

Une autre forme de converti le rayonnement solaire est l'énergie mécanique du vent et de vapeur d'eau

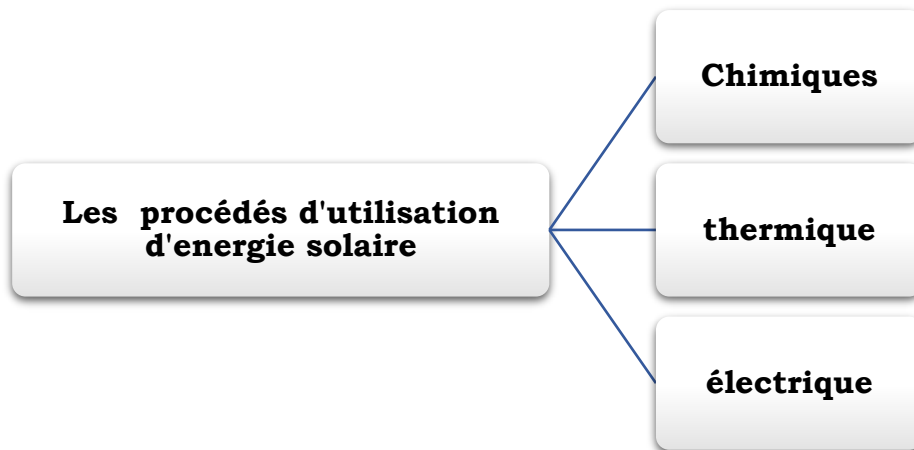


Figure I .1 Les procédés d'utilisation de l'énergie solaire [2]

### **I.3. Les capteurs solaires :**

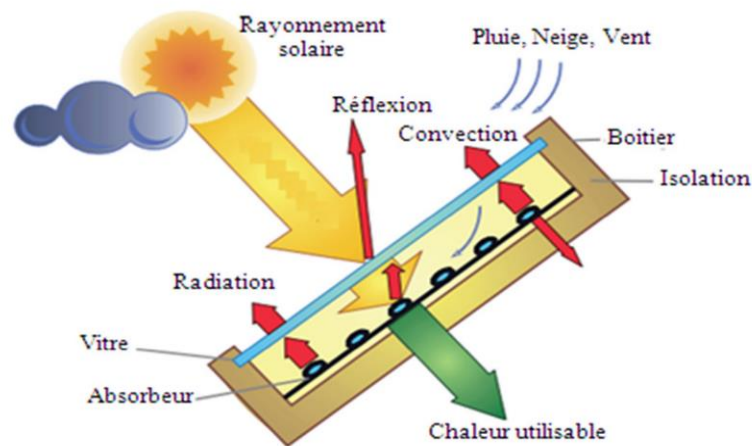
En distingue trois types des capteurs solaires

- ✓ *Capteur solaires thermique*
- ✓ *Capteur solaire photovoltaïque*
- ✓ *Capteur solaire hybride photovoltaïque / thermique*

#### **I.3.1. Capteur solaire thermique :**

##### **I.3.1.1. Principe**

Il est constitué d'une plaque noire absorbe la chaleur du soleil pour la transmettre à de l'eau circulant dans le capteur solaire. Un capteur solaire thermique est principalement utilisé pour le réchauffage de l'eau chaude sanitaire ou le complément au chauffage de la maison ou de l'immeuble. [8].



**Figure I.1** : Capteur solaire thermique [2]

### I.3.1.2. Différents types des capteurs solaires thermique

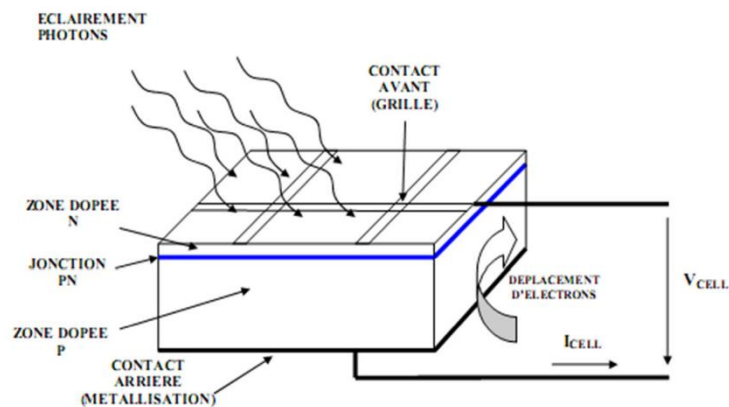
On peut classer le capteur solaire selon la température ; les capteurs à faible température, moyen température, haut température. Suivant ce classement il existe essentiellement trois types des capteurs solaires thermiques.

- ❖ Capteur plan
- ❖ Capteur à tube sous vide
- ❖ Capteur à concentration

### I.3.2. Le capteur solaire photovoltaïque :

Une cellule photovoltaïque est un capteur constitué d'un matériau semi-conducteur absorbant l'énergie lumineuse et la transformant directement en courant électrique. Le principe de fonctionnement de cette cellule fait appel aux propriétés d'absorption du rayonnement lumineux par des matériaux semi-conducteurs. Ainsi, le choix des matériaux utilisés pour concevoir des cellules PV se fait en fonction des propriétés physiques de certains de leurs électrons susceptibles d'être libérés de leurs atomes lorsqu'ils sont excités par des photons provenant du spectre solaire et possédant une certaine quantité d'énergie selon leurs longueurs d'onde.

Une fois libérés, ces charges se déplacent dans le matériau formant globalement un courant électrique



**Figure I.2** : Structure d'une cellule photovoltaïque utilisant

### I.3.2.1. Différents types des capteurs solaires thermique

Il existe plusieurs types de cellules solaires, chacun utilisant différentes technologies et matériaux pour convertir l'énergie solaire en électricité. Voici quelques-uns des principaux types de cellules solaires :

❖ **Cellules solaires au silicium cristallin** : Les cellules solaires les plus couramment utilisées sont basées sur le silicium cristallin. Elles peuvent être soit monocristallines (fabriquées à partir d'un seul cristal de silicium), soit polycristallines (fabriquées à partir de plusieurs cristaux). Ces cellules sont robustes, efficaces et largement utilisées dans les installations solaires résidentielles et commerciales.

❖ **Cellules solaires à couche mince** : Ces cellules sont fabriquées en déposant une fine couche de matériau semi-conducteur sur un substrat. Les matériaux couramment utilisés sont le tellure de cadmium (CdTe), le sulfure de cuivre indium gallium (CIGS) et l'arséniure de gallium (GaAs). Les cellules solaires à couche mince sont plus légères et flexibles, mais ont généralement une efficacité légèrement inférieure aux cellules au silicium cristallin.

❖ **Cellules solaires organiques** : Aussi appelées cellules solaires à base de polymères ou de plastiques, elles sont fabriquées à partir de matériaux organiques. Elles sont légères, flexibles et peuvent être fabriquées à bas coût. Cependant, leur efficacité est généralement plus faible que celle des autres

types de cellules solaires, ce qui les rend plus adaptées aux applications à faible puissance.

❖ **Cellules solaires à concentration** : Ces cellules utilisent des systèmes de concentration optique pour focaliser la lumière solaire sur de petites cellules solaires, ce qui permet d'obtenir un rendement plus élevé. Elles sont souvent utilisées dans les centrales solaires à grande échelle où des miroirs ou des lentilles sont utilisés pour concentrer la lumière solaire sur les cellules.

### **I.3.3. Les capteurs hybrides thermique photovoltaïque**

#### **I.3.3.1. Définition :**

Les capteurs solaires PVT hybrides sont des systèmes utilisant des modules photovoltaïques (PV) comme absorbeur thermique. Par récupération d'une partie de la chaleur dissipée par les modules PV à l'aide d'un fluide caloporteur

La principale caractéristique d'un système solaire hybride PVT est la conversion de rayonnement solaire en électricité et en chaleur en même temps et elles sont généralement tenues au même endroit, ce qui rend le combinaison de ces système est particulièrement intéressante, via le procédé d'extraction de chaleur du PVT, la cellule photovoltaïque est activement refroidie ce qui permet de stabiliser ces performances électriques élevées ; un mètre carré de surface de PVT donne plus d'électricité et de la chaleur par rapport à un mètre carré de module photovoltaïque et d'un mètre carré d'un capteur solaires thermiques séparément installés, les systèmes combinés permettent une apparence plus uniforme sur les toits et diminuée des coûts de l'installation.

#### **I.3.3.2. Les différents types de capteurs hybrides PV/T :**

En peut classer les capteurs hybrides photovoltaïques thermiques selon la nature du fluide utile :

- ✚ Les capteurs hybride à air.
- ✚ Les capteurs hybride à fluide caloporteur liquide.
- ✚ Les capteurs à concentration.

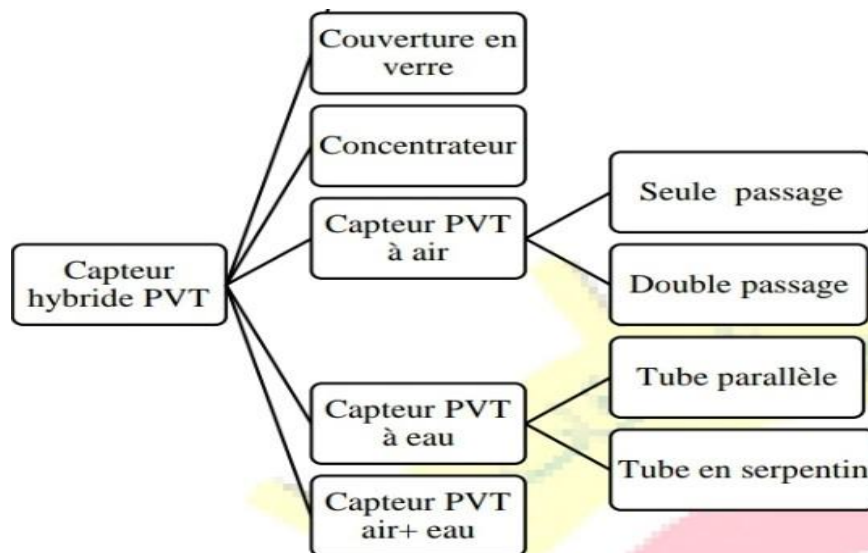


Figure I.9 : Classification des capteurs hybrides PV /T

❖ Les capteurs solaires hybrides à air :

En pratique, les capteurs PVT à air sont principalement utilisés dans les systèmes à circuit ouvert. L'air extérieur est aspiré à l'aide des ventilateurs et alimentés derrière les cellules photovoltaïques. L'air chauffé est souvent utilisé directement pour le chauffage des locaux ou ventilation dans les bâtiments. La même configuration du système peut être utilisée pour la climatisation. Une autre option consiste à utiliser l'air extérieur préchauffé comme source pour une pompe à chaleur air/eau pour chauffer l'eau et/ou pour le chauffage des locaux [24].

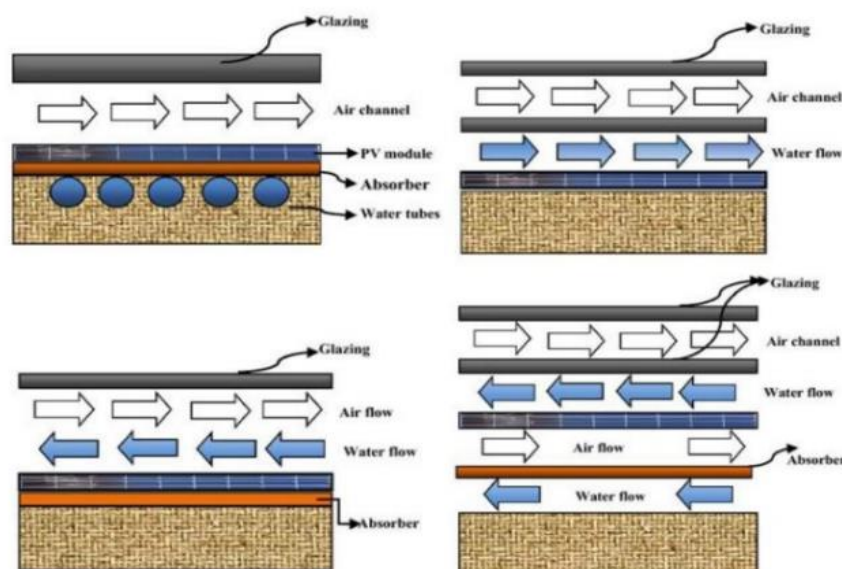
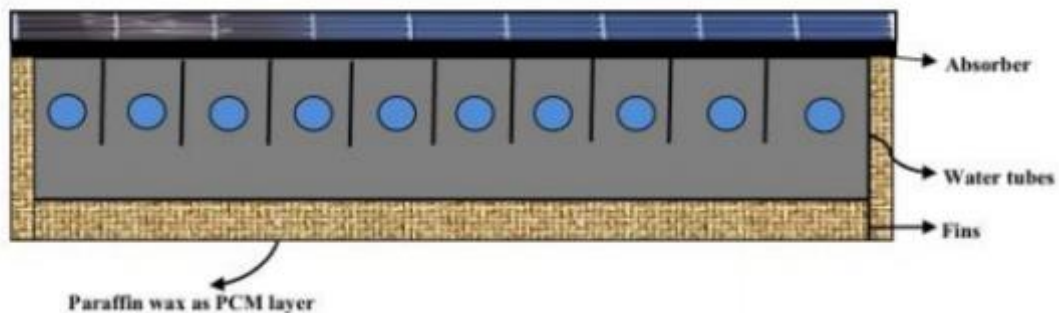


Figure I.10 : Capteur solaire hybride PV/T à air.

### ✚ Les capteurs solaires hybrides PVT à eau :

Afin d'améliorer la performance du système photovoltaïque, beaucoup d'effort a été consacré sur la recherche et le développement de la technologie du système hybride photovoltaïque thermique PVT. L'une des modifications de conception est d'augmenter la performance du module photovoltaïque par circulation de l'eau pour extraire la chaleur utilisant l'eau comme liquide réfrigérant. Ces collecteurs du liquide PVT sont semblables à un collecteur conventionnel avec un liquide ; un absorbeur avec un tube serpentin ou des séries de canalisations verticales parallèles est appliqué, sur lesquelles le module PV a été stratifié ou collé comme joint époxyde adhésif.



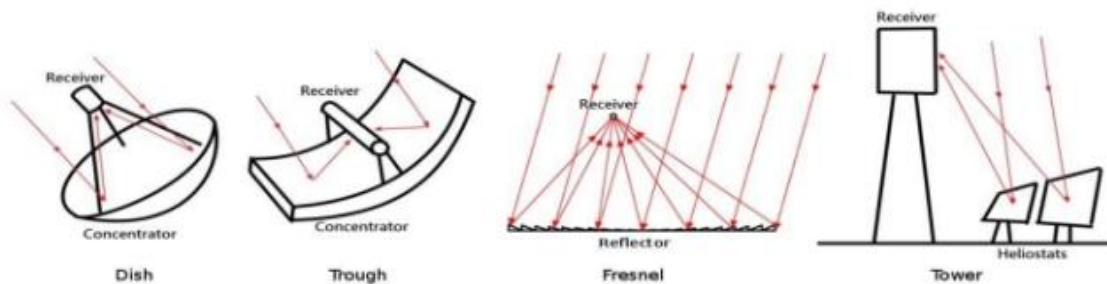
**Figure I.11** : Capteur solaire hybride à eau.

### ✚ Les capteurs PV /T à concentration :

Les capteurs hybrides à concentration sont des dispositifs qui combinent la technologie de concentration optique avec des cellules solaires pour maximiser la conversion de l'énergie solaire en électricité. Ces capteurs utilisent des systèmes de concentration optique pour concentrer la lumière solaire sur de petites cellules solaires, ce qui permet d'obtenir un rendement plus élevé.

Le principe de fonctionnement des capteurs hybrides à concentration repose sur l'utilisation de lentilles ou de miroirs pour concentrer la lumière solaire incidente sur des cellules solaires plus petites et plus efficaces. Cette concentration de la lumière permet d'augmenter l'intensité de la lumière qui atteint les cellules solaires, ce qui augmente la production d'électricité.

Les capteurs hybrides à concentration peuvent être utilisés dans des systèmes solaires photovoltaïques (PV) ou dans des systèmes solaires thermiques (CSP) pour la production d'électricité ou de chaleur. Dans les systèmes PV, les cellules solaires convertissent directement la lumière solaire en électricité, tandis que dans les systèmes CSP, la lumière solaire concentrée est utilisée pour chauffer un fluide, qui à son tour génère de la vapeur pour alimenter une turbine et produire de l'électricité.



**Figure I.12** : Capteurs hybride PVT à concentration

### I.3.3.3. Domaine d'application des capteurs solaires hybrides PVT

Les capteurs PV/T (Photovoltaïque/Thermique) sont des dispositifs qui combinent à la fois la production d'électricité photovoltaïque et la récupération de chaleur. Ces capteurs ont plusieurs domaines d'utilisation, notamment :

- 1) Production d'eau chaude** : Les capteurs PV/T peuvent être utilisés pour chauffer l'eau domestique ou industrielle. En plus de générer de l'électricité, ces capteurs capturent la chaleur résiduelle et l'utilisent pour chauffer l'eau, ce qui permet d'améliorer l'efficacité globale du système.
- 2) Chauffage de l'espace** : Les capteurs PV/T peuvent être utilisés pour le chauffage de l'espace dans les bâtiments résidentiels, commerciaux ou industriels. La chaleur produite par les capteurs peut être utilisée pour alimenter des systèmes de chauffage par air pulsé ou des systèmes de chauffage centralisé.
- 3) Climatisation solaire** : Les capteurs PV/T peuvent être intégrés à des systèmes de climatisation solaire. La chaleur récupérée peut être utilisée pour alimenter des systèmes de refroidissement par absorption ou des systèmes de

climatisation à adsorption, réduisant ainsi la dépendance aux systèmes de climatisation traditionnels.

**4) Production d'électricité :** Les capteurs PV/T génèrent de l'électricité grâce à la conversion directe de la lumière solaire. Cette électricité peut être utilisée pour alimenter des appareils électriques, des systèmes de stockage d'énergie ou être injectée dans le réseau électrique pour une utilisation ultérieure.

Les capteurs PV/T offrent une solution intégrée pour la production simultanée d'électricité et de chaleur, ce qui en fait une technologie polyvalente dans divers domaines d'application. Ils sont particulièrement adaptés aux climats froids ou à forte demande énergétique, où la combinaison de la production d'électricité et de chaleur permet d'optimiser l'utilisation de l'énergie solaire.

#### **I.4. Conclusion**

Dans ce chapitre nous avons réalisé une étude bibliographie sur les capteurs solaires, nous avons présenté la classification de l'énergie solaire, le principe de fonctionnement des capteurs solaires, leurs types et leurs domaines d'application.

## Chapitre II



*Etude numérique et  
Expérimentale*

## Chapitre II

### Modélisation et simulation numérique

#### II.1. Introduction

Les capteurs solaires hybrides PV/T à air sont des dispositifs qui combinent l'énergie solaire photovoltaïque et thermique. C-à-d, en obtenant de l'électricité et de la chaleur en même temps, il se compose par un module photovoltaïque monté sur une boîte métallique creuse isolée thermiquement sur ces faces extérieures, l'air circule sur la face inférieure du module photovoltaïque et il transmet la chaleur dégagée par les cellules solaires, cette chaleur peut être utilisée pour le chauffage des bâtiments et la climatisation.

#### II.2. Mode de transfert de chaleur

Ces trois modes de transfert de chaleur peuvent également se produire simultanément. Par exemple, lorsqu'une casserole chauffe sur une cuisinière, la chaleur se propage à travers le fond de la casserole par conduction, le liquide à l'intérieur de la casserole est chauffé par convection, et la chaleur se dissipe également dans l'air environnant par rayonnement.

**Convection** : C'est le transfert de chaleur entre un solide et un fluide, l'énergie étant transmise par déplacement du fluide.

Ce mécanisme de transfert est régi par la loi de Newton :

$$\varphi = h s(T_p - T_\infty) \quad \text{II.1}$$

Avec :

$\varphi$  : Flux de chaleur transmis par convection (W)

$h$  : Coefficient de transfert de chaleur par convection (W /m<sup>2</sup>. °C)

$T_p$ : Température de surface du solide (°C)

$T_\infty$ : Température du fluide loin de la surface du solide (°C)

$S$  : Aire de la surface de contact solide/fluide

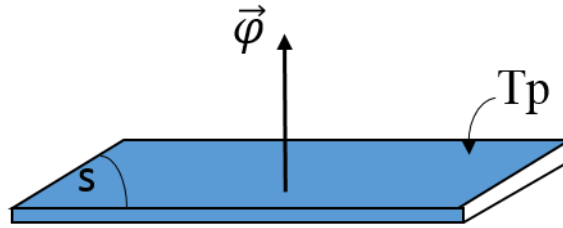


Figure II.1 : Schéma du transfert de chaleur convectif

**-Conduction** : C'est le transfert de chaleur au sein d'un milieu opaque, sans déplacement de matière, sous l'influence d'une différence de température. La propagation de la chaleur par conduction à l'intérieur d'un corps s'effectue selon deux mécanismes distincts : une transmission par les vibrations des atomes ou molécules et une transmission par les électrons libres.

La théorie de la conduction repose sur l'hypothèse de Fourier : la densité de flux est proportionnelle au Gradient de température :

$$\vec{\varphi} = -\lambda S \overrightarrow{\text{grad}}(T) \tag{II.2}$$

Ou sous forme algébrique :

$$\varphi = -\lambda S \frac{\partial T}{\partial x} \tag{II.3}$$

Avec :

$\varphi$  : Flux de chaleur transmis par conduction (W)

$\lambda$  : Conductivité thermique du milieu ( $\text{W m}^{-1} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ )

$x$  : Variable d'espace dans la direction du flux (m)

$s$  : Aire de la section de passage du flux de chaleur ( $\text{m}^2$ )

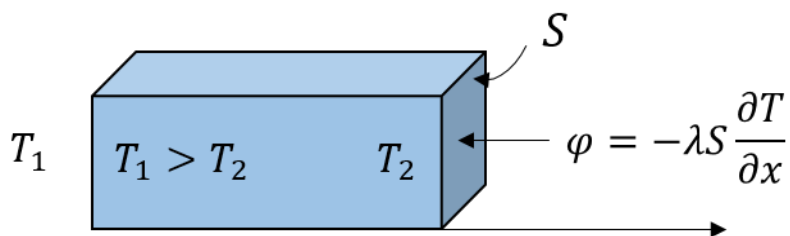


Figure II.2 : Schéma du transfert de chaleur conductif

**-Rayonnement** : C'est un transfert d'énergie électromagnétique entre deux surfaces (même dans le vide). Dans les problèmes de conduction, on prend en compte le rayonnement entre un solide et le milieu environnant et dans ce cas nous avons la relation :

$$\varphi = \sigma \varepsilon_p S (T_p^4 - T_\infty^4) \quad \text{II.4}$$

Avec :

$\varphi$  : Flux de chaleur transmis par rayonnement (W)

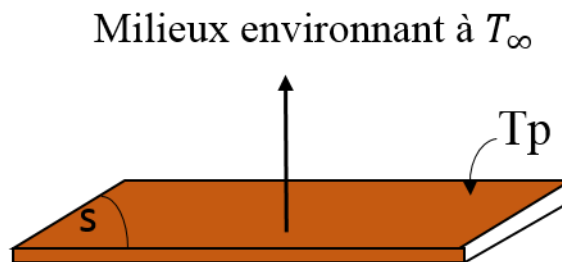
$\sigma$  : Constante de Stefan ( $5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-4}$ )

$\varepsilon_p$  : Facteur d'émission de la surface

$T_p$  : Température de la surface (**K**)

$T_\infty$  : Température du milieu environnant la surface (**K**)

$S$  : Aire de la surface (m<sup>2</sup>)

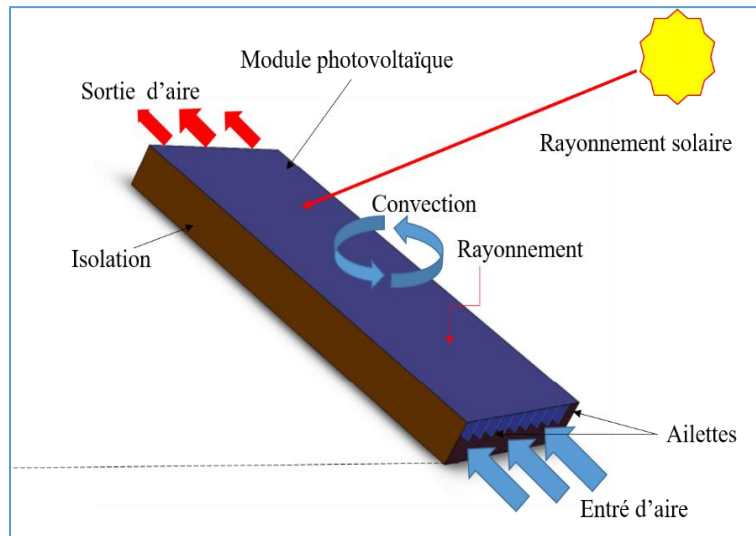


**Figure II.3** : Schéma du transfert de chaleur radiatif

## II.3. Définition du problème physique et mathématique

### II.3.1. Description de la nouvelle géométrie

La figure au-dessus présente la géométrie du problème étudié numériquement le problème de la convection mixte dans ce système hybride PVT à air tridimensionnelle,

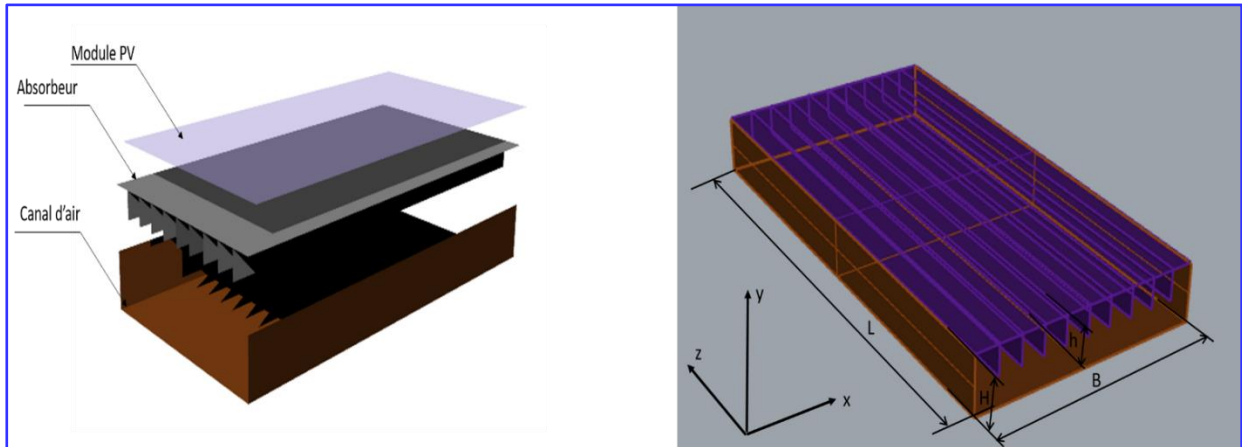


**Figure II.4 :** Principe fonctionnement du capteur hybride PVT à air

Les dimensions du capteur utilisés dans le calcul sont montrées dans le tableau.

Tableau II.1 : Dimension du capteur PVT à air

Paramètre	Dimension	Matière
Langueur du capteur (L)	1 (m)	Aluminium
Largeur du capteur (B)	0.5 (m)	Aluminium
Hauteur du canal d'air (H)	0.1 (m)	Aluminium
Langueur d'ailette (l)	1 (m)	Aluminium
Hauteur d'ailette (h)	0.05 (m)	Aluminium
Epaisseur d'ailette( $\delta$ )	0.001 (m)	Aluminium
Nombre des ailettes	9	
Dimension du canal d'air(L×B×H)	1×0.5×0.1 (m)	Aluminium



**Figure II.5 :** Différents composants du capteur PVT à air

**II.3.2. Le modèle mathématique (Formulation)**

Le problème tridimensionnel (3D) de convection mixte de notre configuration. Les équations régissent l'écoulement du notre problème, s'écrivent comme suit :

L'équation de continuité :

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \tag{II.5}$$

Les équations de quantité de mouvement suivant x, y et z :

Selon x :

$$u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \nu \left( \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) - g\beta_f \Delta T \sin(\alpha) \tag{II.6}$$

Selon Y :

$$u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + \nu \left( \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right) - g \beta_f \Delta T \cos(\alpha) \quad \text{II.7}$$

Selon Z :

$$u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + \nu \left( \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right) \quad \text{II.8}$$

L'équation de l'énergie :

$$u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} + w \frac{\partial T}{\partial z} = \alpha \left\{ \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right\} \quad \text{II.9}$$

Dans ce travail, on a proposé l'étude numérique d'un capteur solaire hybride photovoltaïque thermique PVT à air, donc le modèle K-epsilon standard est le model idéale pour notre simulation, Le système d'équations doit être résolu sous certaines conditions aux limites bien déterminées. Ces conditions correspondent aux caractéristiques du problème de convection mixte dans un capteur solaire hybride PVT à air. Les générales conditions aux limites utilisées dans notre étude sont illustrées comme suit :

Les générales conditions aux limites

- A la paroi supérieure :  $0 < X < L$  ,  $Y = H$  ,  $0 < Z < d$  :  $T_{PVT}$
- A l'entrée : vitesse, Température (velocity inlet, temperature inlet )
- À la sortie d'air :  $X = L$  ,  $0 < Y < H$  ,  $0 < Z < d$  : (Out flow)
- Les parois latérales du système PVT (gauche, droit et arrière) sont adiabatiques

$$u = v = w = 0, \frac{\partial T}{\partial x} = \frac{\partial T}{\partial y} = \frac{\partial T}{\partial z} = 0 \quad \text{II.10}$$

Le taux de transfert de chaleur est l'un des paramètres clés dans le refroidissement des modules photovoltaïques, Le Nusselt (Nu) est un nombre adimensionnel utilisé pour caractériser le type de transfert thermique entre un fluide et une paroi. Il met en rapport le transfert par convection par rapport au transfert par conduction. Il est défini de la manière suivante :

$$\overline{Nu} = \frac{hL_c}{\lambda} \quad \text{II.11}$$

#### II.4. Les performances thermique et électrique du système hybride

Le système hybride photovoltaïque thermique PVT est un système qui converti la quantité d'énergie solaire reçue à une énergie électrique (cellule photovoltaïque) et une chaleur (fluide caloporteur). La formule générale du rendement électrique d'un module photovoltaïque est présentée comme suit :

$$\eta_{ele} = \frac{P_{produite}}{P_{recue}} \quad \text{II.12}$$

$P_{produite}$  : Puissance électrique produite par le système

$P_{recue}$  : Puissance reçue par la surface du capteur solaire

Tan que le rendement thermique est calculé par l'équation suivante :

$$\eta_{th} = \frac{m C_p \Delta T}{P_{recue}} \quad \text{II.13}$$

$$P_{recue} = A * G \quad \text{II.14}$$

Avec  $A$  : surface du captage  $G$  : la quantité du rayonnement solaire.

$\Delta T$  : La différence de température entre la sortie et l'entrée du capteur ( $T_s - T_e$ )

## II.5. Simulation numérique sous logiciel Ansys

### II.5.1. Présentation du logiciel ANSYS

#### ✓ *Introduction :*

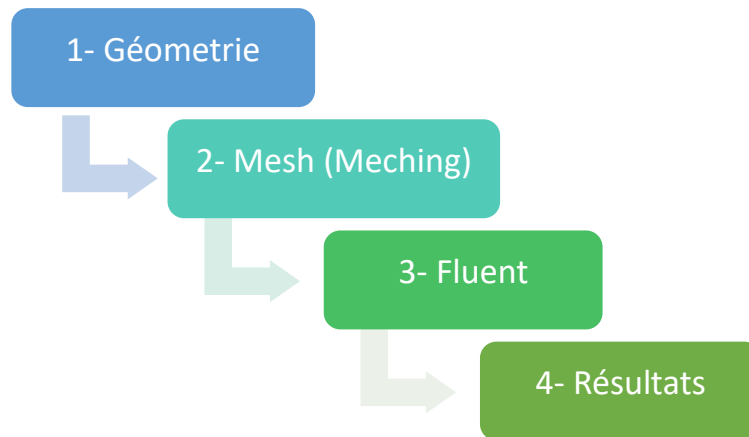
Le premier éditeur mondial dans le domaine du calcul par éléments finis (FEA). Les solutions logicielles proposées permettent de résoudre les problèmes de validation produits de manière efficace et d'optimiser le processus de conception. L'interface Workbench est la plateforme qui encapsule les différentes applications de simulation : Mechanical, Fluent, ACP (Composite), DesignXplorer (Optimisation), SpaceClaim (Modélisation), etc. Cette plateforme s'appuie sur une vue schématique du projet de simulation pour permettre à l'utilisateur de facilement organiser et lier ses différents calculs. (Catalogue de formation ANSYS)

#### ✓ *Définition*

ANSYS est un logiciel de simulation numérique FEM leader de son marché utilisé dans le développement de produits industriels. Il couvre toutes les étapes nécessaires à une simulation : le traitement géométrique, le maillage, la résolution, le traitement de résultats et l'optimisation. ANSYS offre une plateforme de calcul multi-physique intégrant la mécanique des fluides et des structures, l'électromagnétisme, la thermique ainsi que la simulation de systèmes et de circuits.

### II.5.2. Les étapes de simulation sous l'Ansys

Les différentes étapes nécessaires à une simulation pour a une simulation sous Ansys sont comme suit :



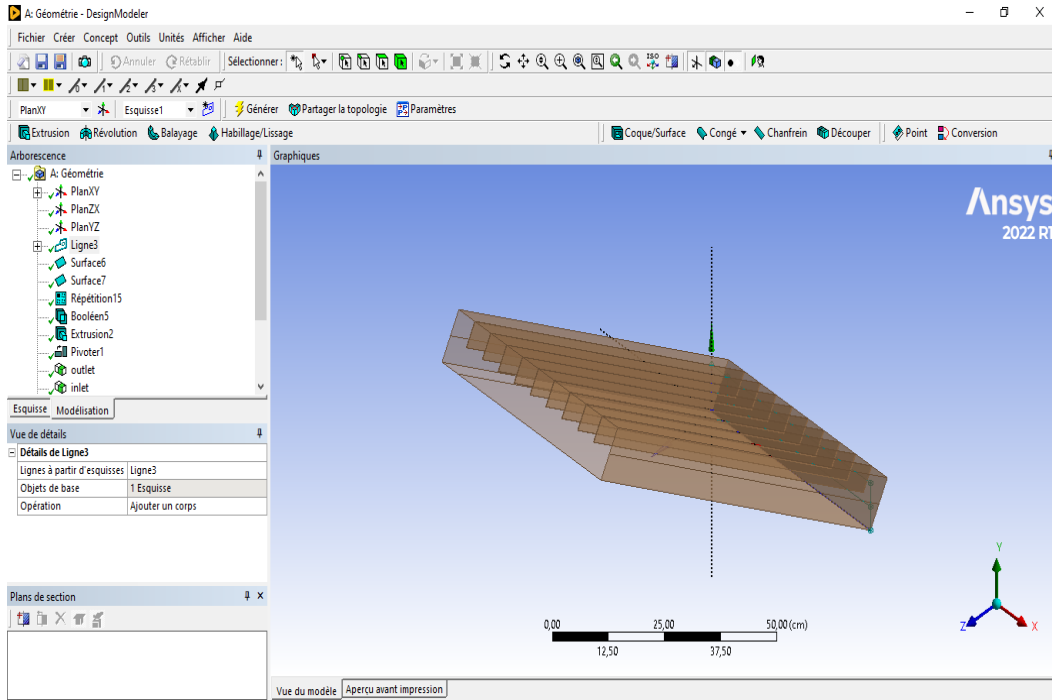
**Figure II.5 :** Les différentes étapes nécessaires à une simulation sous Ansys

Il est constitué de trois sous logiciels aux buts bien définis :

❖ **La géométrie (*Design Modeler*) :**

Contrôle l'affichage des points, des courbes, des surfaces et des corps (volumes de matériau).

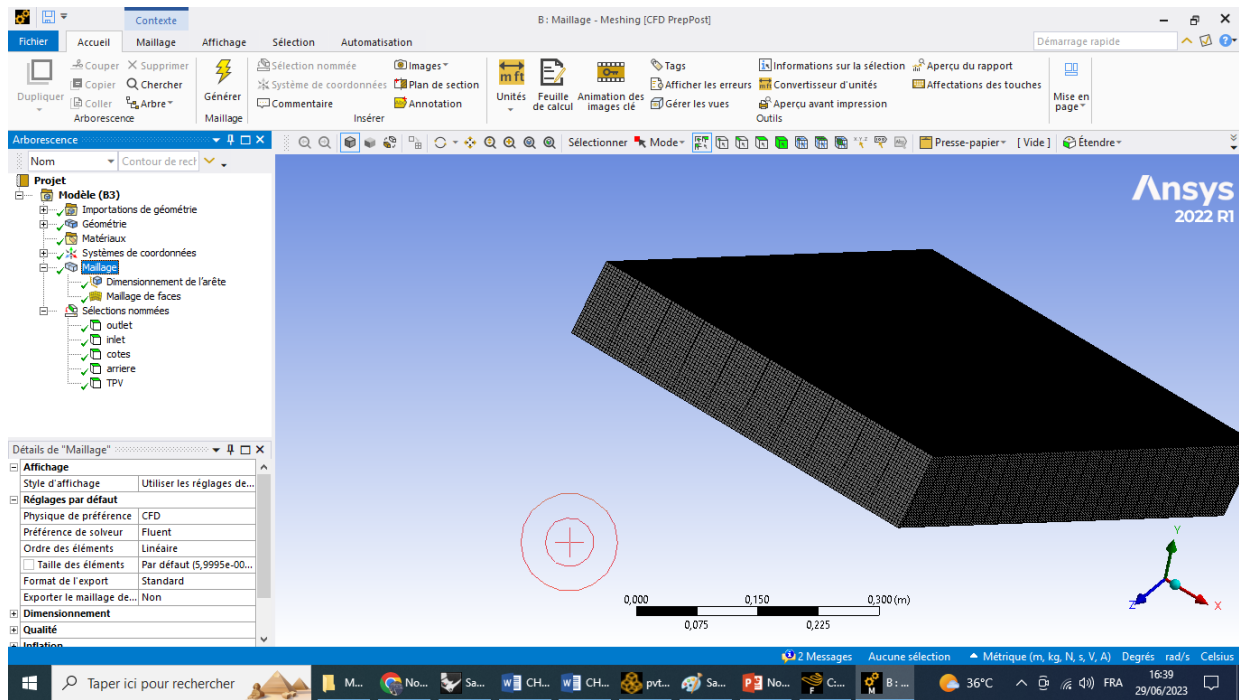
Les sous-ensembles peuvent également être créés, affichés et modifiés. Un sous-ensemble donné peut contenir un nombre quelconque de différents types de géométrie. Une entité donnée peut appartenir à plus d'un sous-ensemble. La géométrie comprend les positions physiques de points caractéristiques définissent la zone que l'on a à mailler : coordonnées spatiales des quatre sommets d'un carré ; du point de départ et du point d'arrivée d'une ligne ; du centre et de l'ouverture angulaire d'un arc de cercle. Il faut pouvoir représenter la zone à étudier par un ensemble de figures géométriques simples raccordées les unes aux autres



**Figure II.6** : La géométrie sous Design Modeler

❖ **Le maillage :**

Le Contrôle l'affichage de tous les types de maille : points (nœuds), lignes (barres), coquilles (tris ou quads) et volumes (tétras, pyramides, prismes, hexas). Les sous-ensembles de cette catégorie sont les mêmes que pour la géométrie, mais ne contiennent que des types d'éléments maillés.



**Figure II.7** : Maillage du capteur PVT

### ❖ **Le maillage du domaine**

Pour des maillages structurés, on peut faire la liaison entre la géométrie et le maillage, Aussi, avant de réaliser le maillage, il faut spécifier par écrit d'une part la géométrie adoptée pour définir la zone à mailler, d'autre part les numéros des mailles correspondant aux points caractéristiques de la géométrie. Un nœud pourra alors être repéré par ces coordonnées physiques  $x$  et  $y$  ou indices  $I$  et  $J$ . Le maillage subdivise le domaine physique en petites cellules qui est en relation entre eux. Chaque cellule est définie par un nœud qui stocke les paramètres des inconnues en fonction des conditions aux limites L'utilisateur doit être définir les limites de la géométrie. Inlet est l'entrée du fluide, Outlet est la sortie,  $T_c$  est la température chaude et adiabatique

### ❖ **Le solveur Fluent :**

Le code de calcul Fluent est commercialisé par le groupe FLUENT. Ce groupe est actuellement l'un des pôles de compétence en mécanique des fluides numérique les plus importants. Il développe et commercialise une solution complète sous forme de logiciels de CFD (Computational Fluid Dynamics)

généralistes qui simulent tous les écoulements fluides, compressibles ou incompressibles, impliquant des phénomènes physiques complexes tels que la turbulence, le transfert thermique, les réactions chimiques, les écoulements multiphasiques pour toute l'industrie. Les produits et services proposés par le groupe FLUENT aident les ingénieurs à développer leurs produits, à optimiser leur conception et à réduire leurs risques. (LIPEME KOUYI, 2004)

ANSYS Fluent utilise la méthode des volumes finis pour la discrétisation de la géométrie en petit volumes élémentaires (quadrilatère, triangulaire, ou les deux). L'ensemble d'équation de Navier Stokes se transforme en systèmes algébrique que le code de calcul applique pour chacune cellule. Cette étape est importante pour faire la simulation.

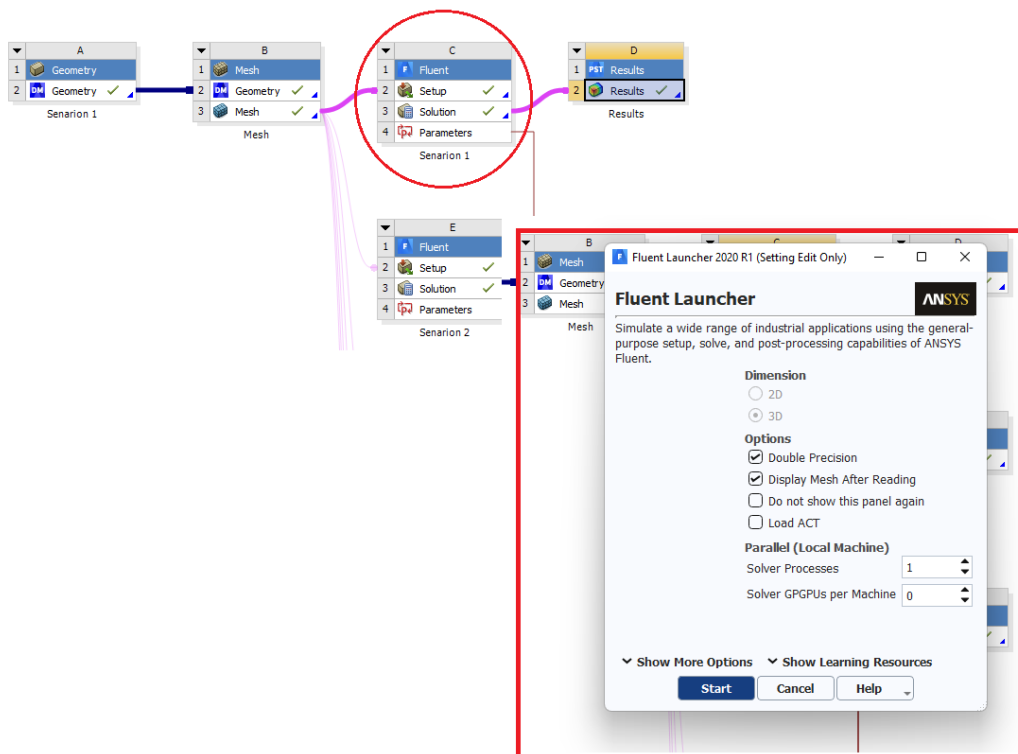
### ❖ **Analyse par Fluent**

FLUENT est un langage de calcul CFD (Computational fluide dynamique) capable de simuler des problèmes des écoulements de fluide et du transfert de chaleur .il est basé sur la méthode des volumes finis pour résoudre les équations associées à des écoulements de fluides :

L'utilisation du logiciel (FLUENT) nous permet de construire un modèle numérique capable de traiter le problème de l'écoulement et le transfert de chaleur par convection mixte pour le cas tridimensionnel. Parmi les modes utilisées dans fluent on a le mode double précision, les nombres à virgules flottante sont représentés en utilisant 64 bits.

### ❖ **Implémentation du Fluent**

Le Software "Fluent" contient deux modes de calcul : double et le simple précision". L'importance de ces modes est la précision des calculs et des résultats trouvés après la convergence de solution, mais ce mode 'double précision' est requiert beaucoup plus de mémoire et du performances considérable pour d'outils informatiques utilisés, ainsi qu'un temps de calcul très important surtout dans les cas où la simulation est en 3D.



**Figure II. 8 :** Interface générale du projet sous Ansys-Fluent

### ❖ *Le modèle physique*

On peut introduire les paramètres d'un écoulement et le modèle numérique utilisé (régime : laminaire, turbulent, model k-e ...etc., selon la figure suivante :

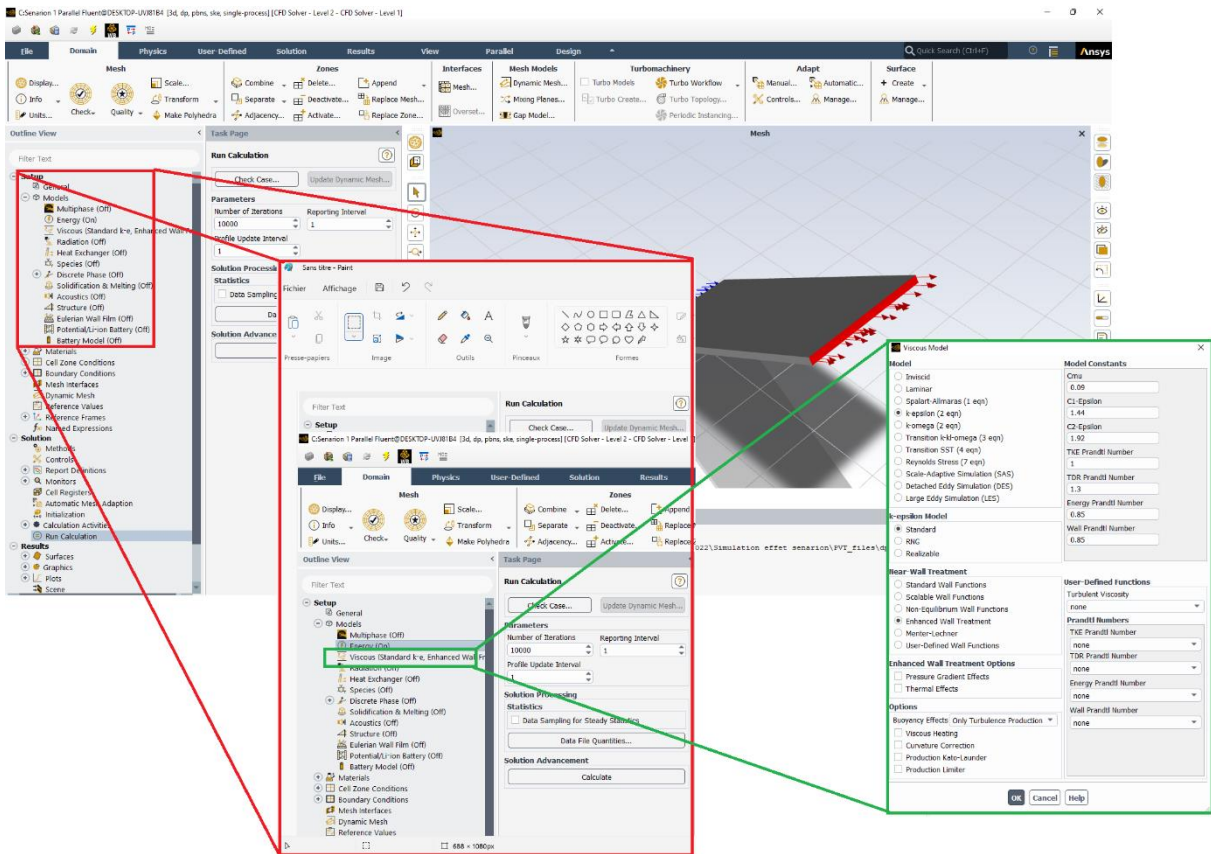


Figure II.9 : Interface de modèle numérique sous Ansys-Fluent

Après la définition du modèle physique, les propriétés des matériaux (fluide, solide) et les conditions de la zone simulée.

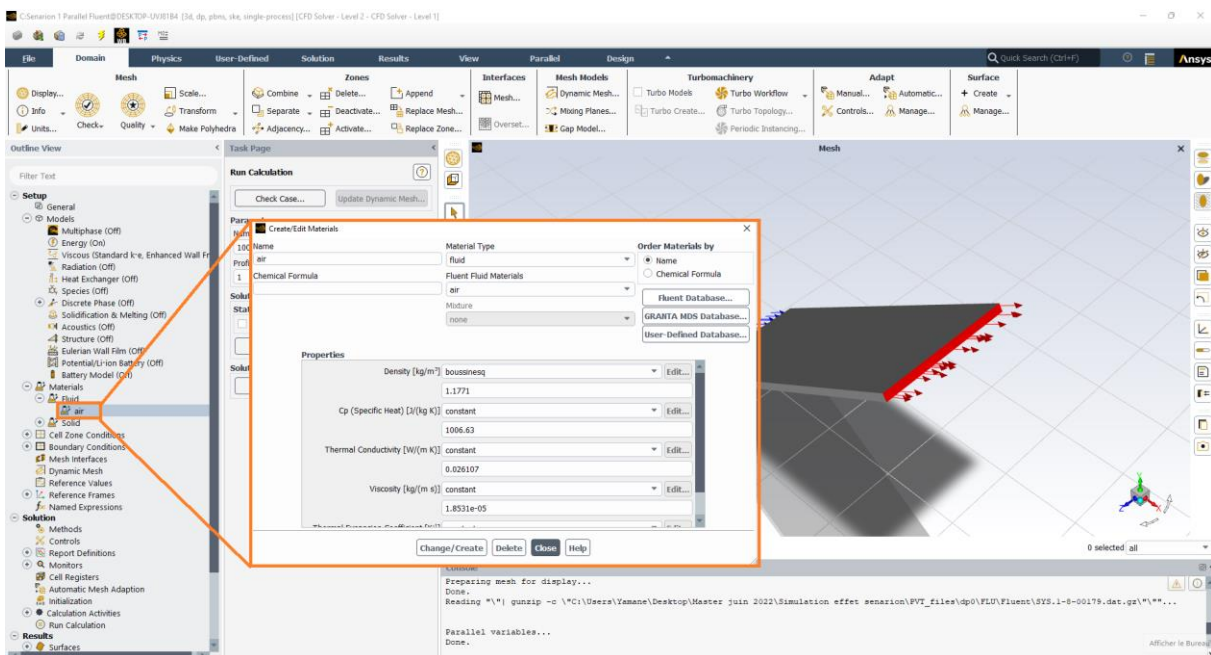


Figure II.9 : Interface des propriétés des matériaux

❖ **Conditions aux limites**

Les conditions initiales et aux limites sont une des étapes importantes dans l'étude de tout phénomène physique. À travers la figure suivante, nous expliquons comment définir les conditions aux limites pour chaque frontière à travers l'interface des conditions aux limites. Ensuite on choisit, la limite puis on rentre la condition qui lui est associée

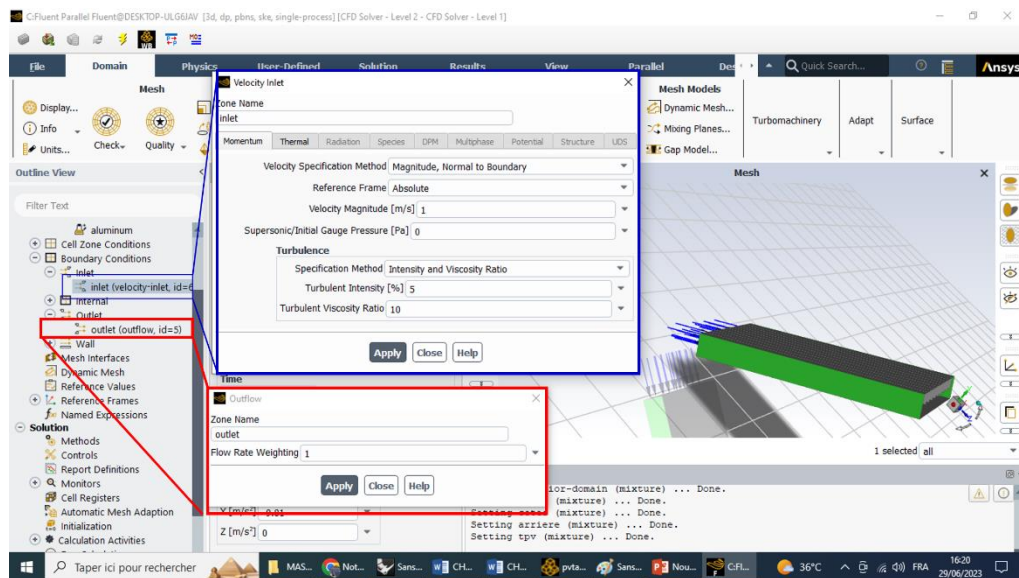


Figure II.10 : Interface Conditions aux limites sous Anses-Fluent

❖ **Valeurs de référence**

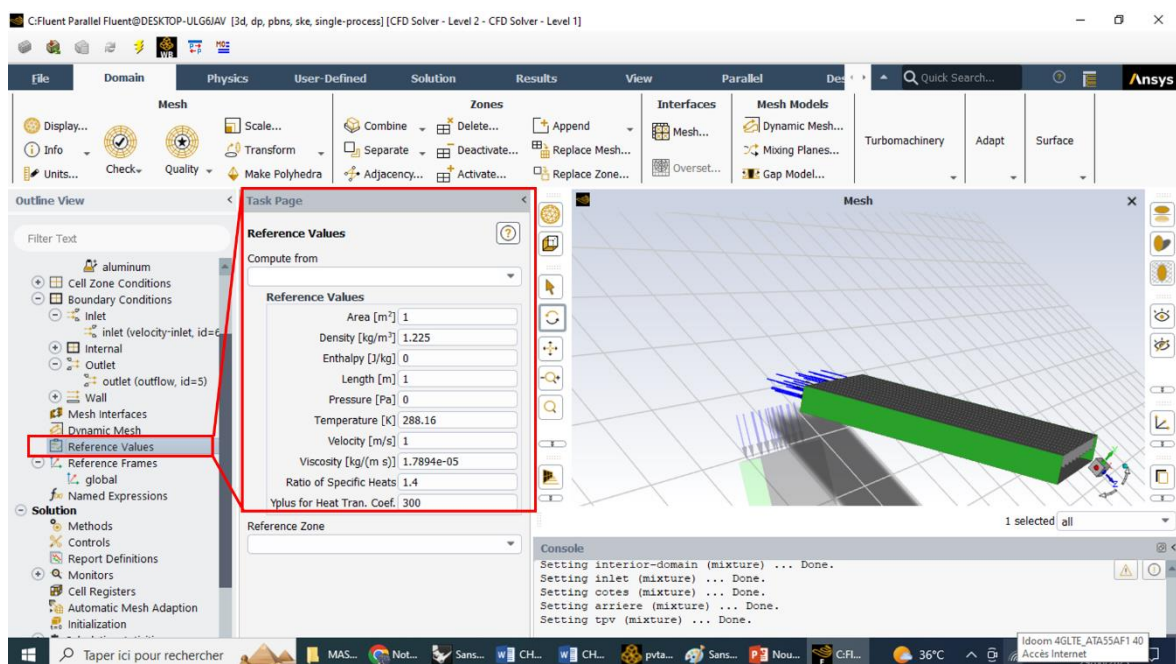


Figure II.11: Interface Valeurs de référence sous Ansys-Fluent

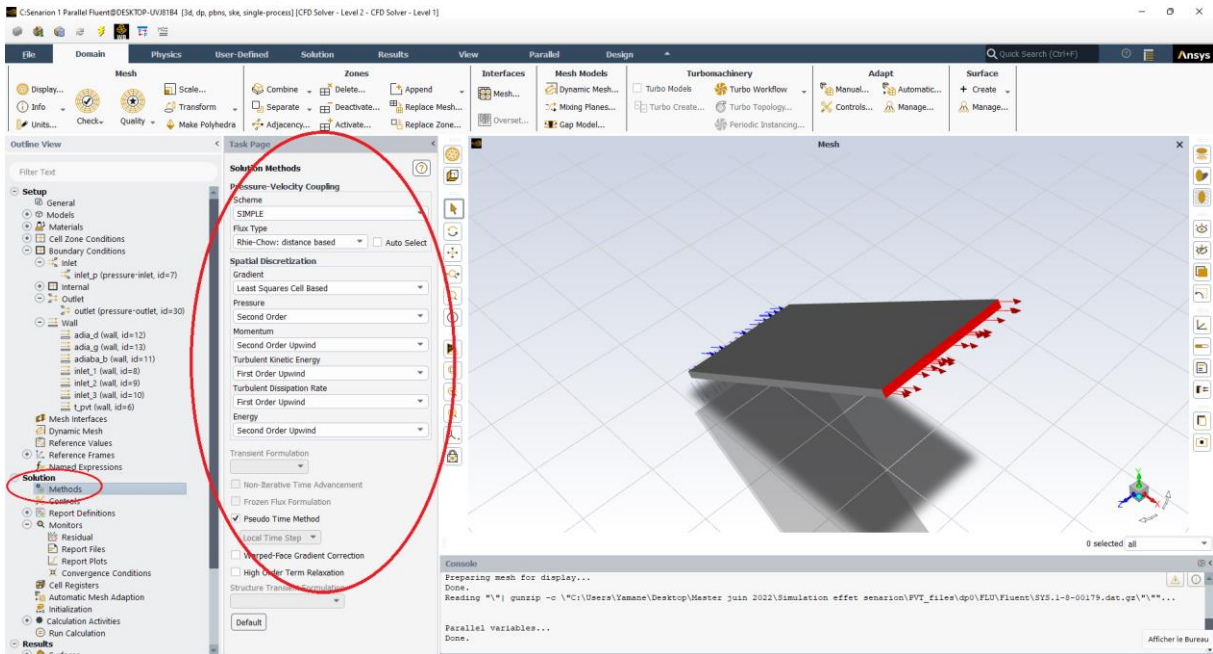
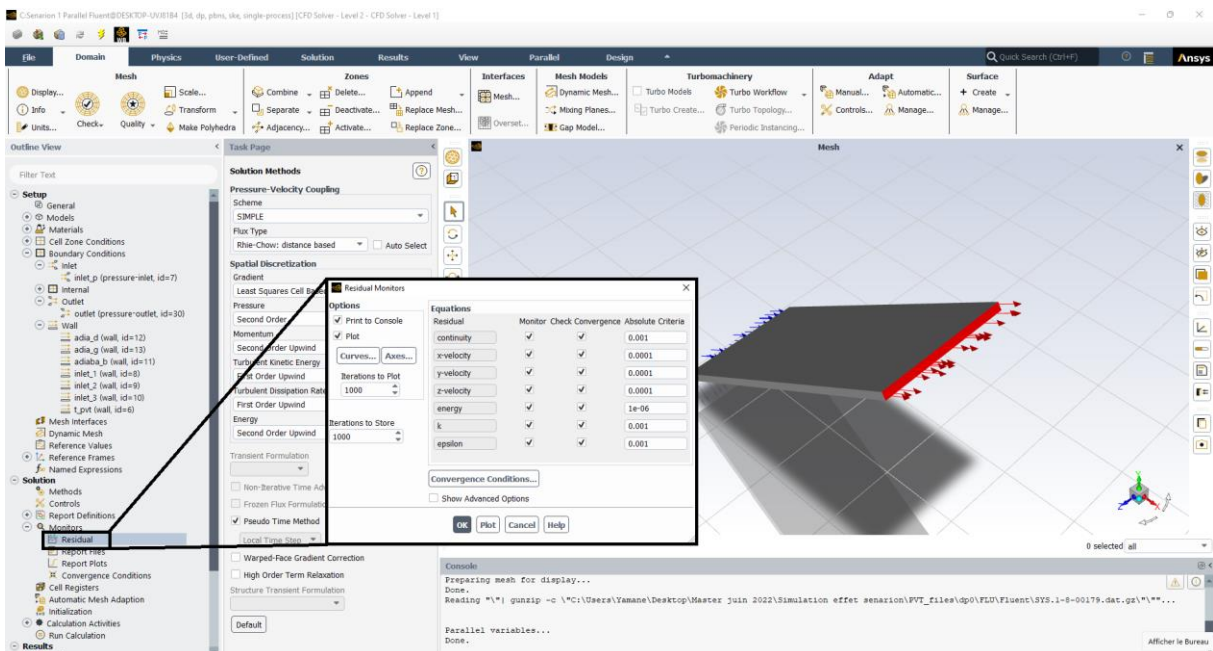


Figure II.11: Interface méthode de solution sous Ansys-Fluent

❖ **Moniteur résiduel**

Le résidu doit être spécifié afin d'obtenir des résultats précis.



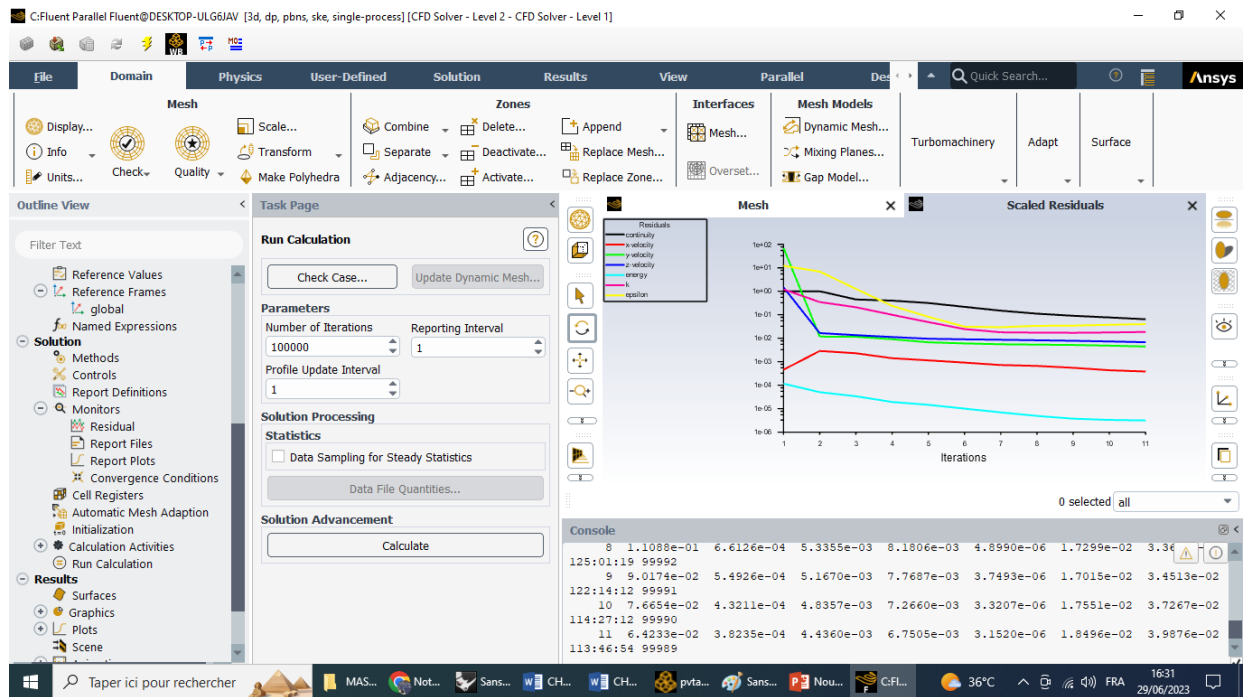
**Figure II.13** : Interface Moniteur résiduel sous Ansys-Fluent

### ❖ *Run Calculation*

La fenêtre "Run Calculation" permet d'initier les itérations de la solution et d'effectuer des calculs en fonction de l'itération pour obtenir les résultats.

### ❖ *Interface résiduelle*

Après la convergence, les résultats sont extraits et sauvegardés.



**Figure II.14** : Interface résiduelle sous Ansys-Fluent

## II.6. Conclusion

Nous avons présenté dans ce chapitre la modélisation et simulation numérique de notre configuration du capteur hybride PVT à air à l'aide d'un logiciel ANSYS-FLUENT, nous avons présenté ; les différents modes de transfert thermique, le modèle mathématique du capteur PV et les étapes de la simulation sur logiciel ANSYS-Fluent.

**Partie III**



*Résultats et discussions*

# Chapitre

## Résultats et discussions

### III.1.Introduction

La modélisation du capteur solaire PVT à l'aide du logiciel ANSYS implique la création d'un modèle numérique représentant géométriquement et physiquement du capteur.

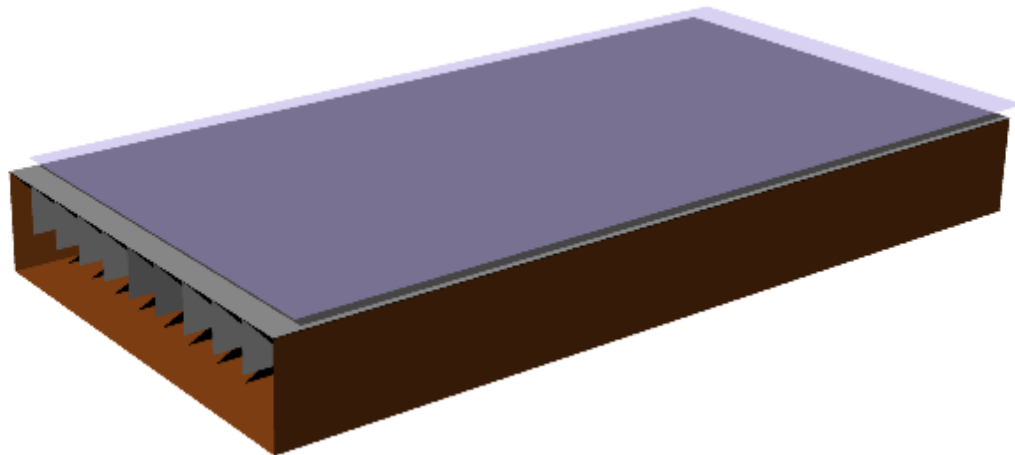
Les principales étapes de la modélisation d'un capteur solaire avec ANSYS que nous avons fait sont les suivant :

- Géométrie : Créez la géométrie du capteur solaire en utilisant les outils de modélisation d'ANSYS. Vous pouvez importer un modèle géométrique existant ou le construire à partir de zéro en utilisant des formes et des opérations de base.
- Matériaux : Attribuez des propriétés matérielles aux différentes parties du capteur solaire. Cela peut inclure des propriétés optiques pour les surfaces d'absorption, des propriétés thermiques pour les matériaux conducteurs de chaleur, etc.
- Conditions aux limites : Définissez les conditions aux limites pour le modèle. Par exemple, spécifiez les conditions d'irradiation solaire, la température ambiante, les flux thermiques entrants et sortants, etc.
- Maillage : Divisez le modèle géométrique en éléments plus petits en créant un maillage. Le maillage permet de discrétiser le modèle et de résoudre les équations numériques sur chaque élément. ANSYS propose différents types de maillages adaptés aux différentes parties du capteur solaire.
- Simulation : Configurez les paramètres de simulation, tels que le type de résolution (stationnaire ou transitoire), les modèles physiques à prendre en compte (rayonnement, conduction thermique, etc.), et lancez la simulation.
- Résultats : Analysez les résultats de la simulation, qui peuvent inclure des distributions de température, de flux de chaleur, d'efficacité énergétique, etc.

Utilisez les outils d'analyse d'ANSYS pour extraire les informations pertinentes et évaluer les performances du capteur solaire.

Dans ce chapitre, nous avons présenté les résultats de la simulation et modélisation numérique obtenus par logiciel Ansys-Fluent

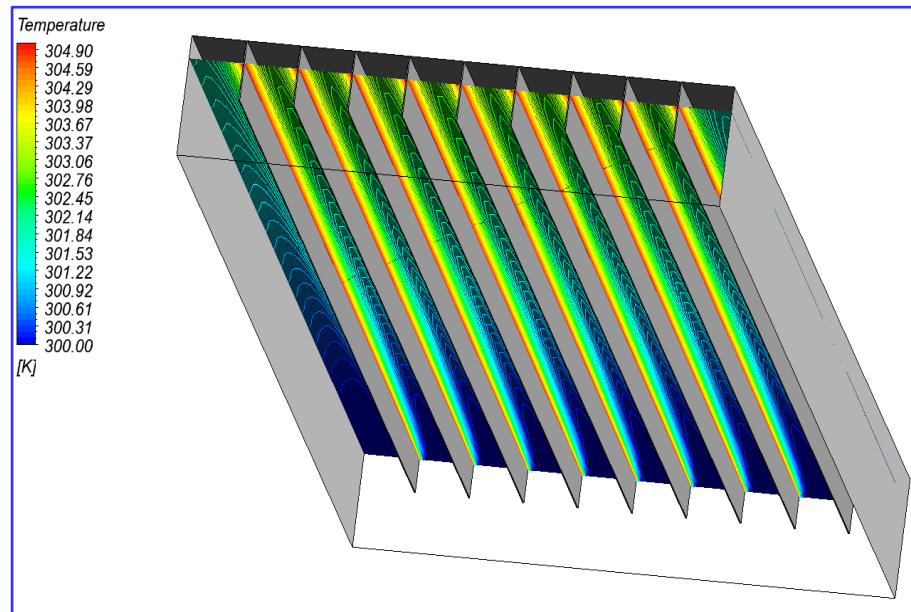
### **III.2.Résultats numériques**



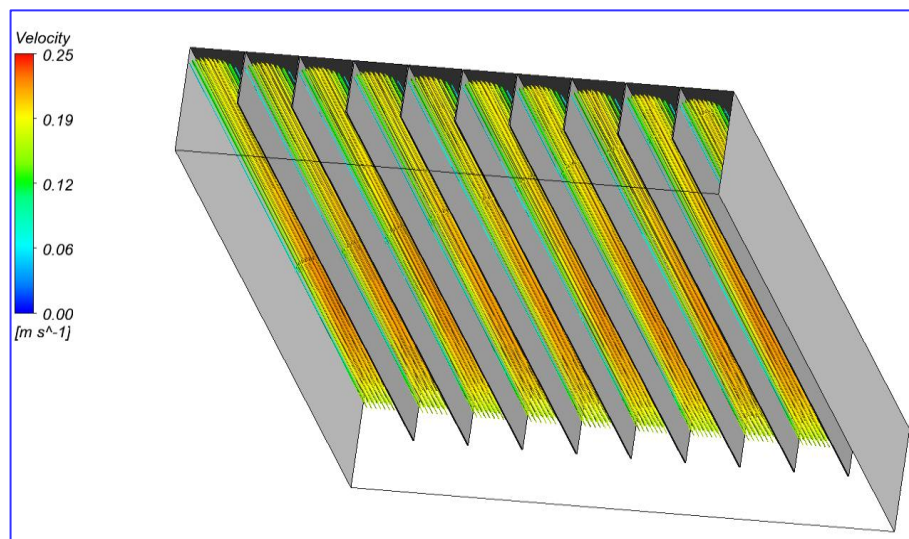
**Figure III. 1 :** Capteur solaire PVT à air

La figure III. 2 Montre le contour de la distribution de température dans un plan parallèle à la direction du fluide (air) dans le canal d'air. L'air entre avec une température de 300K et une vitesse constante est égal à 0.25 m/s, la température à la sortie du capteur atteint 305K, ce qui correspond à un écart de température de 5 degrés, La température de l'air au niveau des surfaces des ailettes est plus chaude par rapport à l'air à l'extérieur de la paroi.

Le contour de la distribution de vitesse dans un plan parallèle à la direction du fluide (air) dans le canal d'air est montre dans la figure III.3

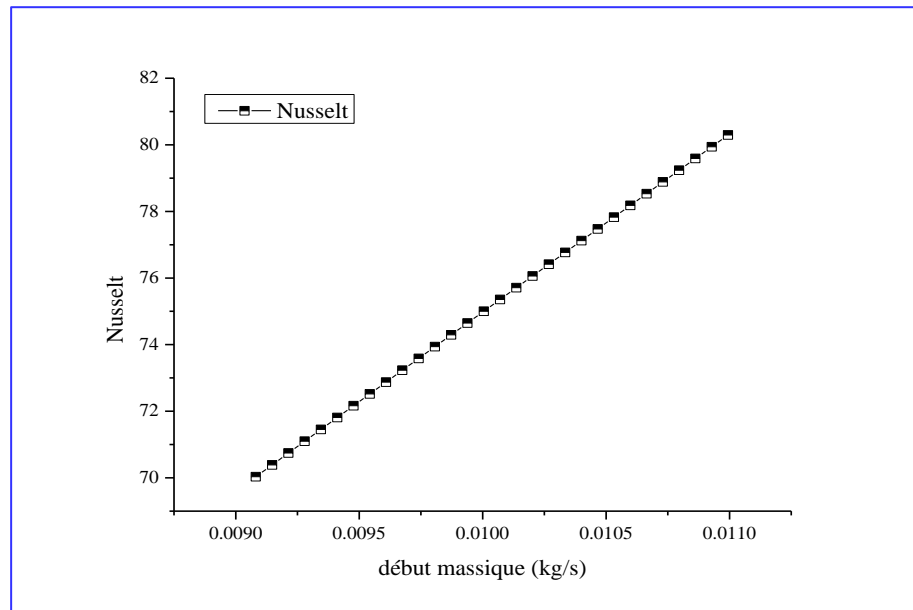


**Figure III. 2 :** Contours de température dans un plan



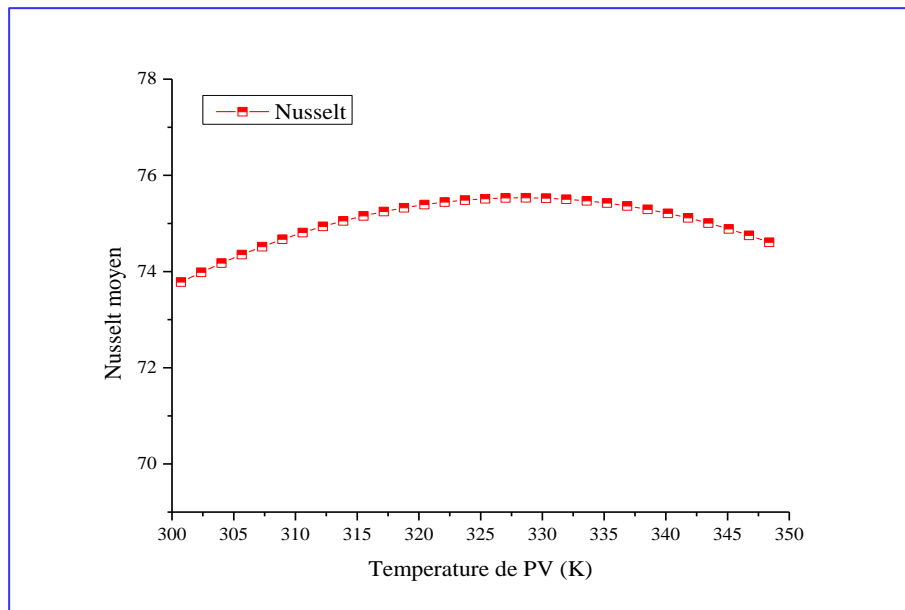
**Figure III. 3 :** Contours de vitesse dans un plan

La figure III. 4 montre l'effet du débit massique sur le nombre Nusselt, Le nombre de Nusselt (Nu) est un nombre sans dimension qui caractérise les transferts de chaleur par convection, l'augmentation du débit massique dans le capteur peut augmenter le nombre de Nusselt. Un débit massique plus élevé peut accroître la turbulence et favoriser un meilleur mélange du fluide, ce qui entraîne une augmentation du transfert de chaleur par convection et qui favorise une augmentation du coefficient de transfert de chaleur.



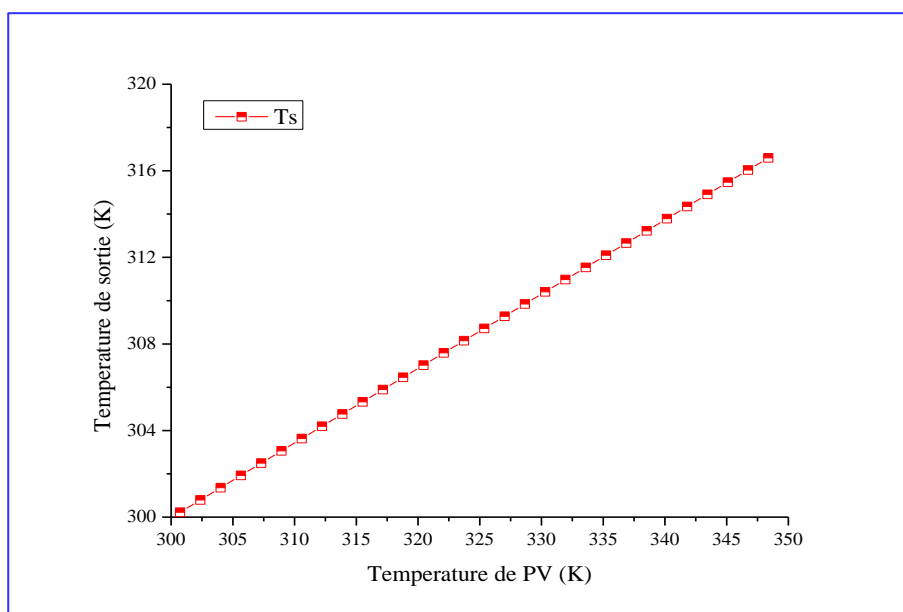
**Figure III.4** : Nusselt en fonction du débit massique

La figure III. 5 montre l'effet de la température de la surface du module PV collé qui en contact avec l'absorbeur sur le nombre Nusselt, une augmentation de la différence de température entre la surface du module PV et l'air peut entraîner une augmentation du nombre de Nusselt. Cela est dû à l'accroissement de la différence de température qui favorise un transfert de chaleur plus important entre la surface et le fluide.



**Figure III. 5 :** Nusselt en fonction de la température PV

La figure III. 6 montre l’effet de la température de la surface du module PV collé qui en contact avec l’absorbeur sur la température d’air à la sortie du capteur, une augmentation de la température d’air avec l’augmentation de la température du module photovoltaïque

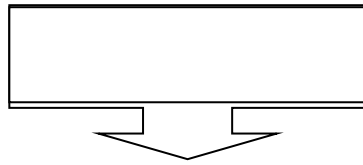


**Figure III.6 :** Température de sortie en fonction de température PV

### **III.3 Conclusion**

Selon les résultats présentés dans ce chapitre :

- Avec un débit massique constant une augmentation de la température d'air dans le capteur est égal à 5 degré.
- L'augmentation du débit massique dans le capteur peut augmenter le nombre de Nusselt ce qui entraîne une augmentation du transfert de chaleur par convection et qui favorise une augmentation du coefficient de transfert de chaleur.
- Une augmentation de la différence de température entre la surface du module PV et l'air peut entraîner une augmentation du nombre de Nusselt.
- La température d'air à la sortie du capteur PVT augmente avec augmentation de la température du module photovoltaïque.



*Conclusion Générale*

## **Conclusion Générale**

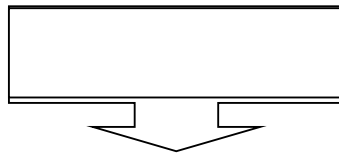
L'énergie solaire est l'énergie provenant du soleil sous forme de rayonnement électromagnétique. Elle est la source d'énergie la plus abondante sur Terre et peut être convertie en d'autres formes d'énergie utilisables, telles que l'électricité et la chaleur, à l'aide de technologies appropriées.

Un capteur hybride PVT (Photovoltaïque Thermique) est un dispositif qui combine à la fois des panneaux solaires photovoltaïques et des panneaux solaires thermiques pour maximiser l'utilisation de l'énergie solaire. Contrairement aux panneaux solaires photovoltaïques traditionnels qui ne capturent que l'énergie lumineuse du soleil pour produire de l'électricité, les capteurs hybrides PVT permettent de récupérer également la chaleur générée par les panneaux solaires.

Dans ce travail nous avons fait une modélisation et simulation numérique du comportement thermique d'un capteur hybride photovoltaïque thermique à air avec des ailettes montées sur l'absorbeur, le travail se fait à l'aide d'un logiciel de simulation numérique Ansys-fluide.

Nous avons obtenu les résultats suivants :

- Avec un débit massique constant une augmentation de la température d'air dans le capteur est égale à 5 degrés.
- L'augmentation du débit massique dans le capteur peut augmenter le nombre de Nusselt ce qui entraîne une augmentation du transfert de chaleur par convection et qui favorise une augmentation du coefficient de transfert de chaleur.
- Une augmentation de la différence de température entre la surface du module PV et l'air peut entraîner une augmentation du nombre de Nusselt.
- La température d'air à la sortie du capteur PVT augmente avec l'augmentation de la température du module photovoltaïque.



# ***Bibliographie***

### Référence bibliographie

- [1] Le-soleil-source-d'énergie-renouvelable :  
<https://www.photovoltaique.info/fr/info-ou-intox/lenergie-solaire/le-soleil-source-denergie-renouvelable/>
- [2] Tabet.I,(2016),Etude, Réalisation et simulation d'un capteur solaire, thèse de doctorat ,Université Mentouri Constantine
- [3] Ben Cheikh el Hocine (2017) Modélisation nano thermique des systèmes Thermo/Photovoltaïques Applications aux collecteurs hybrides PVT, thèse de Doctorat , Université frères M'entourai Constantine,
- [4] Ramdani.(2016) , Etude d'un Capteur Solaire Photovoltaïque/Thermique à Base de Nano-fluide. Université 8 Mai 1945 Guelma
- [5] <https://www.insunwetrust.solar/blog/le-solaire-et-vous/panneau-solaire-hybride>
- [6] <https://www.quelleenergie.fr/economies-energie/aerovoltaique/panneau-solaire-hybride>
- [7] Khelifa, A. (2017), Contribution à la conception et modélisation d'un capteur solaire hybride photovoltaïque thermique PVT (Doctoral dissertation, thèse de doctorat de science en physique, université de Batna) .
- [8] BECHKI. S (2019) , Etude Numérique D'un Capteur Solaire Hybride PVT. Mémoire Master Académique , Université Kasdi Merbah Ouargla.
- [9] Tabet.I, Touafek.K , Bellel.N , Khelifa.A , baissi.M.T (2016) , étude expérimentale d'un capteur hybride pv/t à eau avec réflecteurs latérales, 4ème séminaire international sur les énergies nouvelles et renouvelables, Ghardaïa Algérie
- [10] Daniel. Z , Evelyn. B , Aleksis. B (2017) , PVT Wrap-Up Energy systems with photovoltaic-thermal solar , This study was commissioned by SwissEnergy , SwissEnergy, Swiss Federal Office of Energy (SFOE).
- [11] Yves Jannot , christian Moyne , Alain Degiovanni (2022) , transfert de chaleur l conduction et convection , Printed and bound in Great Britain by CPI Group (UK) Ltd,Croydon.

- [12]** ANA-MARIA BIANCHI YVES FAUTRELLE JACQUELINE ETAY (2004), transferts thermiques , universitaire de la francophonie.
- [13]** Y. Jannot, thermique solaire, 2011
- [14]** Yves. Jannot, transferts thermiques, 2012.