

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne Démocratique et Populaire

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Ministère de l'Enseignement supérieur et de la Recherche scientifique

جامعة أبي بكر بلقايد - تلمسان

Université Abou Bakr Belkaid– Tlemcen

Faculté de Technologie



MÉMOIRE

Présenté pour l'obtention du **diplôme** de **Master**

En : Génie Mécanique

Spécialité : Energétique

Par :

OUADAH Mourad et BOUHLAGHEM Alaa Eddine

Sujet

Impact des paramètres dynamiques sur les performances d'un capteur solaire plan

Soutenu publiquement le /06/2025, devant le jury composé de :

Mme BENAHMED. L	MCB	Univ. Tlemcen	Présidente
Mme MOSTEFAOUI. A	MCB	Univ. Tlemcen	Examinatrice
Mme SICHAIB. A	MAA	Univ. Tlemcen	Encadrante
Mr ALIANE. K	Professeur	Univ. Tlemcen	Co-Encadreur

Remerciement :

Avant tout, nous tenons à exprimer notre gratitude envers ALLAH, pour la santé, la détermination et la patience qu'il nous a accordées pour finaliser notre parcours universitaire et réaliser ce projet de recherche avec succès.

Nous souhaitons exprimer notre profonde gratitude et notre reconnaissance envers nos superviseurs. Mme. SICHAIB AMEL et M. ALIANE KHALED pour leur compréhension, disponibilité, expertise et leurs précieux conseils, la confiance qu'ils nous ont accordée tout au long de ce projet ainsi que toute l'assistance qu'ils nous ont fournie.

Nous tenons aussi à remercier les membres du jury pour l'intérêt qu'ils portent à nos recherches en acceptant de revoir nos travaux.

Dédicace :

Je dédie ce modeste travail avec une grande émotion :

À mes parents pour leur amour inestimable, leur confiance indéfectible, leur soutien constant et leurs sacrifices.

À mes frères, à ma sœur.

Je le consacre également à toute ma famille et à mes précieux amis.

À mon partenaire de travail **OUADAH Mourad**.

À mes encadrants **Mme. SICHAIB AMEL**

Et M. ALIANE KHALED.

Ainsi qu'à tous ceux qui ont contribué, de près ou de loin, à la réalisation de ce travail.

Dédicace :

Je dédie ce modeste travail avec une grande émotion :

À mes parents pour leur amour inestimable, leur confiance indéfectible, leur soutien constant et leurs sacrifices.

À ma femme, à ma sœur ainsi qu'à ses enfants et à mon jeune frère.

Je le consacre également à toute ma famille et à mes précieux amis.

À mon partenaire de travail **BOUCHLAGHEM ALAA EDDINE**.

À mes encadrants **Mme. SICHAIB AMEL**

Et M. ALIANE KHALED.

Ainsi qu'à tous ceux qui ont contribué, de près ou de loin, à la réalisation de ce travail.

Résumé :

L'un des principaux défis de l'exploitation de l'énergie solaire réside dans la compréhension des mécanismes influençant le transfert de chaleur entre le fluide caloporteur et l'absorbeur d'un capteur solaire. Dans ce contexte, ce travail vise à étudier l'influence de plusieurs paramètres tels que la forme des chicane, la vitesse d'entrée du fluide et le type de fluide utilisé sur les performances thermiques d'un capteur solaire plan. Deux géométries de chicane (rectangulaires et trapézoïdales) sont comparées, ainsi que différentes vitesses d'entrée (0.2, 0.5 et 0.8 m/s) et deux fluides caloporteurs (air et eau). Les résultats, sous forme de contours et de profils de température et de vitesse, permettent d'évaluer l'impact de chaque paramètre sur la répartition de l'écoulement et le niveau de réchauffement du fluide. L'ensemble de ces données a été interprété et comparé afin de mieux comprendre le rôle des conditions d'écoulement dans la performance thermique du capteur.

Mots clés : Capteur solaire, simulation numérique, chicane, ANSYS,

ملخص

أحد التحديات الرئيسية لاستغلال الطاقة الشمسية يكمن في فهم الآليات التي تؤثر على انتقال الحرارة بين السائل الناقل للحرارة والممتص في المجمع الشمسي. في هذا السياق، يهدف هذا العمل إلى دراسة تأثير عدة معايير مثل شكل الحواجز، سرعة دخول السائل ونوع السائل المستخدم على الأداء الحراري لجهاز استشعار شمسي مسطح. يتم مقارنة هندستين مختلفتين للحواجز (مستطيلة وشبه منحرفية)، بالإضافة إلى سرعات دخول مختلفة (0.2، 0.5 و 0.8 م/ث) ونوعين من السوائل الناقلة للحرارة (الهواء والماء). تسمح النتائج، على شكل منحنيات وملفات لدرجة الحرارة والسرعة، بتقييم تأثير كل معلمة على توزيع التدفق ومستوى تسخين السائل. تم تفسير مجموعة هذه البيانات ومقارنتها من أجل فهم أفضل لدور ظروف التدفق في الأداء الحراري لجهاز الاستشعار.

الكلمات المفتاحية : مجمع شمسي، محاكاة رقمية، عائق، ANSYS،.....

Summary

One of the main challenges of harnessing solar energy lies in understanding the mechanisms influencing the heat transfer between the heat transfer fluid and the absorber of a solar collector. In this context, with this in mind, this work aims to study the influence of several parameters such as the shape of the baffles, the inlet fluid velocity, and the type of fluid used on the thermal performance of a flat solar collector. Two geometries of baffles (rectangular and trapezoidal) are compared, as well as different inlet velocities (0.2, 0.5, and 0.8 m/s) and two heat transfer fluids (air and water). The results, in the form of contours and temperature and velocity profiles, allow for the evaluation of the impact of each parameter on the flow distribution and the level of fluid heating. All of this data was interpreted and compared to better understand the role of flow conditions in the thermal performance of the sensor.

Keywords: Solar collector, numerical simulation, baffle, ANSYS,

Introduction générale :	1
Chapitre I : Généralités sur l'énergie solaire.....	2
I.1. Introduction.....	2
I.2. Soleil	2
I.2.1. Description du soleil.....	2
I.2.2. Constitution du soleil	3
I.2.3. Evolution du soleil	4
I.3. Aspects géométriques	5
I.3.1. Mouvements de la Terre.....	5
I.3.1.1. Rotation de la Terre autour d'elle-même	5
I.3.1.2. Rotation de la Terre autour du soleil	6
I.3.2. Coordonnées célestes	7
I.3.2.1. Coordonnées géographiques	7
a) Latitude du lieu φ	7
b) Longitude (Φ).....	7
I.3.2.2. Coordonnées horaires	8
I.3.2.3. Coordonnées horizontales.....	10
I.3.3. Temps solaires.....	11
I.3.3.1. Temps solaire vrai (TSV)	11
I.3.3.2. Temps solaire moyen (TSM)	11
I.3.3.3. Temps universel (TU).....	12
I.3.3.4. Temps légal (TL)	12
I.3.3.5. Constante solaire (I_c).....	12
I.3.3.6. Angle d'incidence (θ) :	13
I.4. Aspects énergétiques.....	14
I.4.1. Rayonnement solaire	14
I.4.1.1. Composante du rayonnement solaire :.....	14
I.4.1.2. Différents types de rayonnement solaire :	15
I.5. Corps noir.....	19
I.6. Gisement solaire.....	19
I.7. Conclusion	22
Chapitre II : Capteurs solaires plans.....	23
II.1. Introduction.....	23
II.2. Définition.....	23
II.3. Principe de fonctionnement	24

II.3.1. Effet de serre	24
II.4. Composantes d'un capteur solaire plan	25
II.4.1. Absorbeur.....	25
II.4.2. Fluide caloporteur	27
II.4.3. Couverture transparente	28
II.4.4. Isolation thermique	31
II.4.4.1. Isolants minéraux	32
II.4.4.2. Isolants naturels	32
II.4.4.3. Isolants organiques	32
II.4.4.4. Isolant transparent (Aérogel de silice).....	33
II.4.5. Coffre (boîtier)	34
a) Boîtier simple	34
b) Boîtier double	34
II.5. Classification des capteurs.....	34
II.5.1. Fluide de travail utilisé.....	34
a) Air.....	34
b) Eau	35
II.5.2. Orientation des capteurs.....	35
a) Capture solaire fixe.....	35
b) Capture solaire a poursuite	36
II.5.3. Types des composants.....	36
II.5.3.1. Couverture	36
II.6. Bilan thermique global de la paroi absorbante	38
II.6.1. Rendements d'un capteur solaire.....	40
II.6.2. Expression du coefficient global de pertes	41
II.6.2.1. Capteur solaire couvert de type 1	41
II.6.2.2. Capteur solaire couvert de type 2	45
II.6.2.3. Capteur solaire non-couvert de type 3.....	45
II.6.2.4. Capteur solaire non-couvert de type 4.....	46
II.7. Bilan thermique de la couverture transparente	46
II.8. Conclusion	46
Chapitre III : Résultats et discussion.....	48
III.1. Présentation du logiciel ANSYS	48
III.2. Principes des codes CFD.....	49
III.2.1. Partie de géométrie	50

III.2.1.1. Présentation du problème.....	50
III.2.2. Partie de maillage	52
III.2.3. ANSYS FLUENT.....	53
III.2.3.1. Conditions aux limites	54
III.3. Discussion	54
III.3.1. Effet de chicanes.....	54
III.3.1.1. Champs de vitesse.....	54
III.3.1.2. Champs de température.....	56
III.3.1.3. Profils de vitesse	58
III.3.1.4. Profils de température	59
III.3.2. L'effet du débit :	60
3.2.1. Champs de vitesse.....	61
Interprétation.....	62
III.3.2.2. Champs de température.....	62
Interprétation.....	63
III.3.2.3. Profils de vitesse	64
Interprétation.....	65
III.3.2.4. Profils de température	66
Interprétation.....	67
III.3.3. Effet des propriétés thermophysiques du fluide	67
3.3.1. Champs de vitesse.....	68
Interprétation.....	68
III.3.3.2. Champs de température.....	69
Interprétation.....	69
III.3.3.2. Profils de vitesse	70
Interprétation.....	70
III.3.3.2. Profils de température	71
Interprétation.....	71
Conclusion générale	73
Bibliographie.....	74

Listes des figures

Figure I.1: Structure du soleil.....	4
Figure I.2: Cycle de vie du soleil	5
Figure I.3: Représentation des déplacements de la terre autour du soleil	7
Figure I.4: Longitude et la latitude	8
Figure I.5: Variation annuelle de la déclinaison solaire.....	9
Figure I.6: Repère des coordonnées horaires	10
Figure I.7: L'azimut et hauteur de soleil.....	11
Figure I.8: Décalage horaire par rapport au méridien de Greenwich.....	12
Figure I.9: Angle d'incidence.....	13
Figure I.10: Longueur d'onde de rayonnement solaire.....	15
Figure I.11: Pyrhéliomètre.....	16
Figure I.12: Pyranomètre.....	17
Figure I.13: Carte du monde de l'ensoleillement moyen annuel.....	19
Figure I.14: Moyenne annuelle de l'irradiation solaire globale reçue sur un plan incliné à la latitude.....	21
Figure I.15: Répartition territoriale des stations météorologiques en ALGERIE.....	22
Figure II.1 : Capteur solaire plan.....	23
Figure II.2: Schéma montrant le principe de l'effet de serre.....	24
Figure II.3 : Exemples des absorbeurs	27
Figure II.4 : Isolation thermique.....	31
Figure II.5 : Capteur solaire à air	35
Figure II.6: Vu d'un capteur solaire non vitré.....	37
Figure II.7: Description d'un capteur solaire non vitré	37
Figure II.8: Capteur plan vitré intégré à la toiture.....	38
Figure II.9: Principe de fonctionnement des capteurs plans vitrés.....	38
Figure II.10: Schématisation des flux convectifs dans un capteur couvert de type 1.....	41
Figure II.11: Schématisation des flux convectifs dans un capteur solaire couvert de type 2... 45	45
Figure II.12: Schématisation des flux convectifs dans un capteur solaire non-couvert de type 3.....	45
Figure II.13: Schématisation des flux convectifs dans un capteur solaire non-couvert de type 4.....	46
Figure III.1: Interface de logiciel ANSYS Workbench.....	48
Figure III.2: Absorbeur avec chicanes rectangulaires	51
Figure III.3: Absorbeur avec chicanes trapézoïdales.....	52
Figure III.4: Maillage généré final de géométrie étudié.....	53
Figure III.5: Contour de vitesse d'un absorbeur avec chicanes trapézoïdales	54
Figure III.6: Contour de vitesse d'un absorbeur avec chicanes rectangulaires	55
Figure III.7: Contour de température d'un absorbeur avec chicanes trapézoïdales	56
Figure III.8: Contour de température d'un absorbeur avec chicanes rectangulaires.....	56
Figure III.9: Profil de vitesse d'un absorbeur avec chicanes trapézoïdales	58
Figure III.10: Profil de vitesse d'un absorbeur avec chicanes rectangulaires	58
Figure III.11: Profil de température d'un absorbeur avec chicanes trapézoïdales	59
Figure III.12: Profil de température d'un absorbeur avec chicanes rectangulaires.....	60
Figure III.13: Contour de vitesse avec $V_e = 0.2$ m/s.....	61
Figure III.14: Contour de vitesse avec $V_e = 0.5$ m/s.....	61

Figure III.15:Contour de vitesse avec $V_e = 0.8 \text{ m/s}$	61
Figure III.16:Contour de température avec $V_e = 0.2 \text{ m/s}$	62
Figure III.17:Contour de température avec $V_e = 0.5 \text{ m/s}$	63
Figure III.18:Contour de température avec $V_e = 0.8 \text{ m/s}$	63
Figure III.19:Profil de vitesse avec $V_e=0.2\text{m/s}$	64
Figure III.20:Profil de vitesse avec $V_e=0.5\text{m/s}$	64
Figure III.21:Profil de vitesse avec $V_e=0.8\text{m/s}$	65
Figure III.22:Profil de température avec $V_e=0.2 \text{ m/s}$	66
Figure III.23:Profil de température avec $V_e=0.5 \text{ m/s}$	66
Figure III.24:Profil de température avec $V_e=0.8 \text{ m/s}$	67
Figure III.25:Contour de vitesse d'un absorbeur a air.....	68
Figure III.26:Contour de vitesse d'un absorbeur a eau	68
Figure III.27:Contour de température d'un absorbeur a air	69
Figure III.28:Contour de température d'un absorbeur a eau	69
Figure III.29:Profil de vitesse d'un absorbeur a air	70
Figure III.30:Profil de vitesse d'un absorbeur a eau	70
Figure III.31:Profil de température d'un absorbeur a air	71
Figure III.32:Profil de température d'un absorbeur a eau	71

Liste des tableaux

Tableau I.1:Caractéristiques principales du soleil.....	3
Tableau I.2: Indice de réfraction moyen n dans le spectre solaire de certains	14
Tableau I.3:Coefficients de trouble.	15
Tableau I.4:Variation de la pression atmosphérique avec l'altitude	16
Tableau I.5:Albédo solaire de différentes surfaces.	18
Tableau I.6:Répartition du potentiel solaire par région climatique au niveau	20
Tableau II.1 : Caractéristiques des matériaux utilisés comme l'absorbeur	25
Tableau II.2: Revêtements des surfaces d'absorbeur	26
Tableau II.3: Propriétés de différentes couvertures transparentes	Error! Bookmark not defined.
Tableau II.4: propriétés thermiques des quelques matériaux isolants	32
Tableau III.1:Détails du maillage généré.	53

Nomenclature :

Symbole	Désignation	Unité
φ	La latitude	Degré
Φ	Longitude	Degré
δ	Déclinaison solaire	Degré
ω	Angle horaire	Degré
a	L'azimut solaire	Degré
h	Hauteur du Soleil	Degré
I_c	Constante solaire	W/m ²
θ	Angle d'incidence	Degré
τ_{dir}	Transmissivité totale de l'atmosphère pour le rayonnement solaire direct incident	/
$I_{dir\ h}$	Rayonnement direct reçu sur un plan horizontal	W/m ²
$I_{dir\ h}$	Éclairement énergétique direct reçu sur un plan horizontal.	W/m ²
τ_{dif}	Coefficient de transmission du flux diffus	/
$I_{dif\ h}$	Flux diffus reçu sur un plan horizontal	W/m ²
I_{dif}	Flux diffus reçu sur un plan incliné	W/m ²
λ	Conductivité thermique	W/m.k
a	Coefficient d'absorption	/
ε	Coefficient d'émission	/
d	Densité	/
P	Masse volumique	Kg/m ³
ϕ_{sa}	Flux solaire absorbé	W
$\phi_{p \rightarrow}$	Flux perdu à travers la paroi absorbante	W

ϕ_u	Flux utile transmis au fluide caloporteur	W
ϕ_{st}	Flux stocké dans le capteur	W
M_{eCeau}	Masse en eau du capteur	J.°C
T	Température	°C
t	Temps	S
$G_{[i,y]}^*$	Densité de flux solaire incident sur le capteur	W.m ²
τ_{cs}	Coefficient de transmission de la couverture transparente par rapport au rayonnement solaire	/
α_{ps}	Coefficient d'absorption de la paroi absorbante par rapport au rayonnement solaire.	/
S	Surface	m ²
Q_{cf}	Débit calorifique du flux caloporteur	W.°C ⁻¹
T_{fe}	Température du fluide caloporteur à l'entrée de l'absorbeur	°C
T_{fs}	Température du fluide caloporteur à sortie de l'absorbeur	°C
h_p	Coefficient global de pertes du capteur	W/m ² . °C
T_{pm}	Température moyenne de la paroi absorbante	°C
T_a	Température de l'air extérieur	°C
η	Rendement global	/
η_i	Rendement interne	/
η_o	Rendement optique	/
ϕ_p^\uparrow	Pertes thermiques vers le haut	W
$\phi_{c,p-c}$	Flux échangé par convection-conduction entre la paroi absorbante et la couverture.	W
$\phi_{r,p-c}$	Flux échangé par rayonnement entre la paroi absorbante et la couverture.	W
$\phi_{c,c-a}$	Flux échangé par convection entre la couverture et l'air extérieur.	W
$\phi_{r,c-c}$: Flux échangé par rayonnement entre la couverture et le milieu extérieur.	W

$h_{c,p-c}$	le coefficient de transfert de chaleur entre deux surfaces parallèles délimitant un espace clos contenant de l'air.	W/m ² . °C
α_{pi}	Coefficient d'absorption de la plaque par rapport au rayonnement IR.	/
α_{ci}	Coefficient d'absorption de la couverture par rapport au rayonnement IR	/
u_{vent}	la vitesse moyenne du vent	m/s
ε_a	Emissivité de l'atmosphère	/
T_{cm}	Température moyenne de la couverture	°C
T_{ciel}	Température équivalente du ciel	°C
Φ_p^\downarrow	Pertes thermiques vers le bas	W
$\Phi_{c,p-b}$	Flux échangé par convection-conduction entre la paroi et le bas	W
$\Phi_{r,p-b}$	Flux échangé par rayonnement entre la paroi et le bas.	W
λ_i	Conductivité thermique de l'isolant.	W/m.°C
e_i	Epaisseur de l'isolant.	m
α_{bi}	Coefficient d'absorption du fond du capteur par rapport au rayonnement IR	/
Φ_p	Pertes thermiques totales	W
TSV	Temps solaire vrai	h
TSM	Temps solaire moyen	h
ET	Equation du temps	/
TU	Temps universel	h
TL	Temps légal	s
alb	Albédo	/

Introduction générale :

L'énergie solaire fait référence à l'énergie émise par les rayons solaires. Cette énergie est la source de toutes les formes de production d'énergie. Actuellement, elle est classée parmi les énergies renouvelables et est suffisante pour être convertie en d'autres formes. Comme pour l'énergie thermique et l'énergie électrique.

Face aux crises économiques et à la hausse des prix du carburant ou de l'électricité, il est nécessaire de mener des études et recherches axées sur l'exploitation de l'énergie solaire afin d'élaborer d'autres alternatives énergétiques ou de garantir l'approvisionnement en énergies fossiles (pétrole, gaz naturel, charbon, etc.).

L'une des méthodes d'exploitation de l'énergie solaire est le capteur solaire. Ce dispositif fait partie des techniques les plus couramment employées pour la génération de chaleur et d'énergie thermique, qui peuvent être utilisées pour le séchage solaire ou pour l'habitat, entre autres.

Ce travail vise à étudier l'influence des paramètres dynamiques sur les performances d'un capteur solaire grâce à une analyse numérique effectuée avec le code de calcul ANSYS FLUENT Workbench version 22.0, qui se spécialise en mécanique des fluides.

Le but de cette thèse est d'examiner l'impact des paramètres dynamiques sur les performances des capteurs solaires. Par conséquent, afin de faciliter la compréhension du lecteur et d'en tirer profit grâce aux analyses, conclusions et résultats obtenus, nous avons structuré notre travail en trois chapitres, à savoir :

- ✚ Le premier chapitre présente un aperçu de l'énergie solaire thermique avec des généralités sur le gisement solaire.
- ✚ Le deuxième chapitre est consacré à l'étude théorique du capteur solaire plan, ses différentes composantes, son fonctionnement et son utilisation.
- ✚ Le troisième chapitre comporte une procédure de résolution numérique, qui repose sur le logiciel Ansys FLUENT Workbench, est décrite ci-après. La géométrie et le maillage sont produits par le préprocesseur. De plus, la simulation et l'analyse des résultats numériques pour les configurations examinées sont également présentées.

Finalement, ce mémoire sera clôturé par une conclusion globale qui synthétise les résultats majeurs obtenus, accompagnée de projections futures envisageables sur la base de cette recherche.

Chapitre I : Généralités sur l'énergie solaire

I.1. Introduction

Le rayonnement solaire qui atteint la surface terrestre résulte d'interactions complexes entre l'énergie solaire, l'atmosphère, et le sol. À l'échelle mondiale, les variations de rayonnement solaire selon les latitudes sont influencées par la géométrie de la Terre et son mouvement de rotation autour du Soleil. Toutefois, à des niveaux régionaux et locaux, le relief joue un rôle majeur en modifiant la distribution du rayonnement. Des éléments comme l'altitude, la pente du sol, l'orientation, et les ombres projetées par différentes formations géographiques génèrent des différences significatives à l'échelle locale. Cette variabilité spatiale et temporelle de l'énergie solaire influe sur la dynamique de nombreux facteurs environnementaux, notamment la température de l'air et du sol, le taux d'humidité, la fonte des neiges, la photosynthèse, et l'évapotranspiration.

Le rayonnement solaire est uniformément réparti dans l'espace, mais il présente des variations au fil du temps et selon les lieux. Pour surveiller ces variations, des réseaux de stations équipées de pyromètres et de systèmes de collecte de données sont généralement installés aux emplacements souhaités. Cependant, le nombre de ces stations n'est souvent pas suffisant pour fournir des données précises, surtout dans les pays en développement. Notre pays bénéficie d'un ensoleillement important, ce qui fait de la technologie solaire une solution avantageuse, notamment dans le sud de l'Algérie.

I.2. Soleil

I.2.1. Description du soleil

Toute source d'énergie sur terre découle du soleil. Cela s'applique aussi bien aux énergies non renouvelables provenant de sources fossiles, telles que les hydrocarbures issus de la photosynthèse, qu'aux énergies renouvelables comme l'énergie solaire, géothermique, la biomasse... etc. [1]

Le soleil, une étoile naine de forme pseudo-sphérique et considérée comme une vaste sphère de gaz extrêmement chaud, est majoritairement composé d'hydrogène (80%) et d'hélium (19%), le reste, soit 1%, étant un assortiment de plus de cent éléments chimiques. Malgré sa taille moyenne, le soleil constitue 99,9% de la masse du système solaire, faisant ainsi peser fortement la gravité de son imposante masse sur l'ensemble du système. [2]

Le tableau ci-dessous présente les principales caractéristiques du soleil :

Tableau I.1:Caractéristiques principales du soleil [1]

Caractéristique	Valeur
Masse	$1,989.10^{30}$ kg
Masse volumique moyenne	1410 kg/m ³
Diamètre	$13,92.10^5$ km
Distance du centre de la voie lactée	$2,5.10^{47}$ km
Vitesse	217 km/s
Température superficielle	5770 k
Puissance rayonnée	$3,83.10^{23}$ kw

La figure (I.1) présente une illustration de la structure du soleil. On identifie trois zones spécifiques.

I.2.2. Constitution du soleil

a. Structure interne du soleil

Cette partie se divise en trois zones distinctes ; le noyau, la zone radiative et la zone convective. Elle constitue 40% de la masse du soleil et elle couvre une épaisseur de 25.10^4 km. Sa température monte à plusieurs millions de degrés et la pression atteint un milliard d'atmosphères. [1]

b. Photosphère

Il s'agit d'une couche opaque d'environ 300 km d'épaisseur. Sa température atteint plusieurs millions de degrés, qui diminue rapidement au sein de la couche jusqu'à atteindre ce qu'on appelle la température de surface, approximativement 4500°C . [3]

c. Chromosphère et couronne solaire

Il s'agit d'une région à faible densité où la matière est fortement dispersée, elle représente l'atmosphère du soleil. Cette couche se distingue par une émission de rayonnement extrêmement faible et une température très élevée (approximativement un million de degrés). [4]

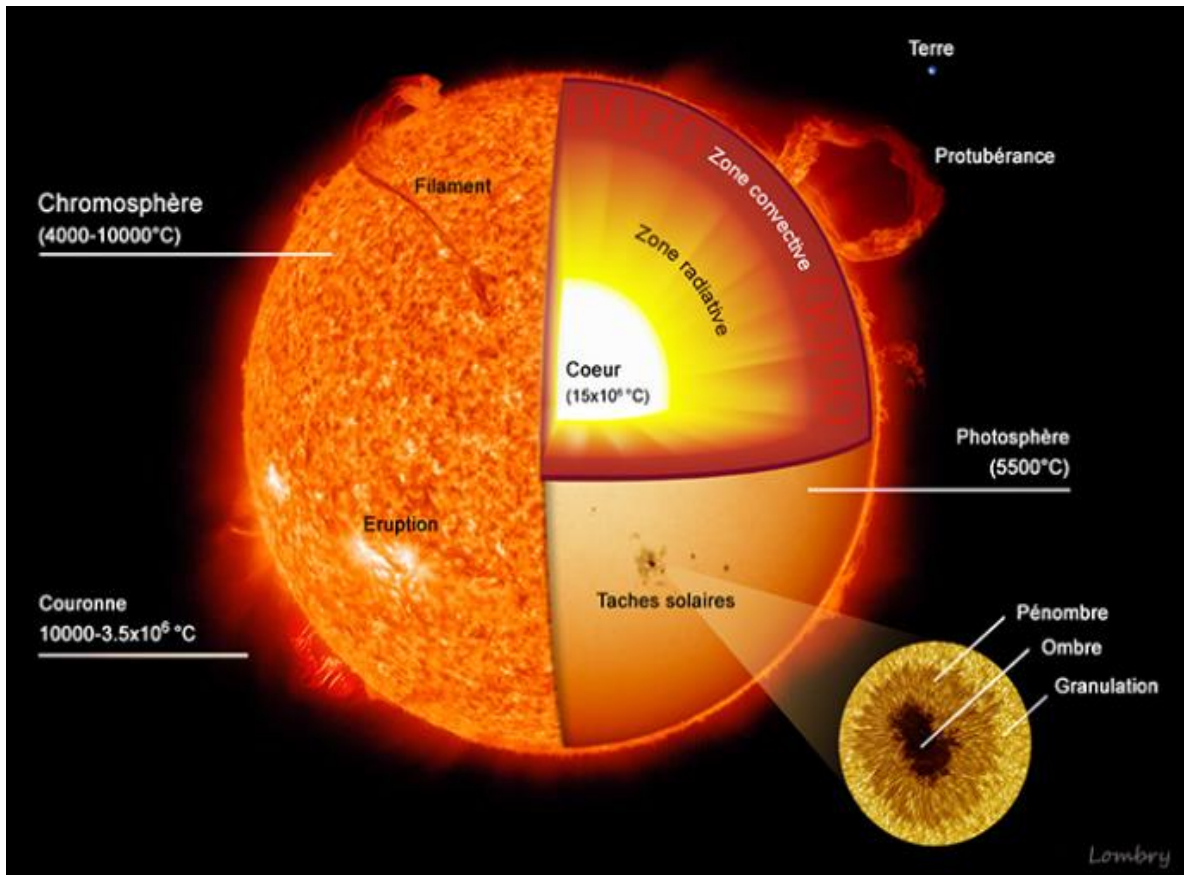


Figure I.1: structure du soleil [5]

I.2.3. Evolution du soleil

Au cours des cinquante premiers millions d'années de sa vie, le soleil s'est rétréci pour parvenir à peu près à sa dimension actuelle. La contraction de l'astre a libéré de l'énergie gravitationnelle qui a réchauffé son intérieur. Quand le noyau est devenu assez chaud, la contraction s'est arrêtée, cédant la place à une réaction de fusion thermonucléaire. [6]

La longévité du soleil est conditionnée par la quantité d'hydrogène encore disponible à consommer. On estime qu'il a existé pendant environ 4,5 milliards d'années et qu'il continuera à exister sous sa forme actuelle pour au moins encore 5 milliards d'années. [6]

Quand le soleil aura épuisé son stock d'hydrogène, sa structure se modifiera. Sa surface extérieure s'étendra au-delà de la trajectoire orbitale actuelle de la terre, où il se métamorphosera en une supergéante rouge, un peu plus froide à la surface qu'à présent, mais 10 000 fois plus lumineuse du fait de son immense taille. Le soleil continuera à être une géante rouge, consommant de l'hélium dans son noyau, pendant à peine 500 millions d'années. Suite à cette phase, le noyau résiduel du soleil s'écroulera pour donner naissance à une naine blanche de taille similaire à celle de la Terre, puis se refroidira graduellement pendant des milliards d'années. [6]

La figure I.2 présente le cycle de vie du soleil.

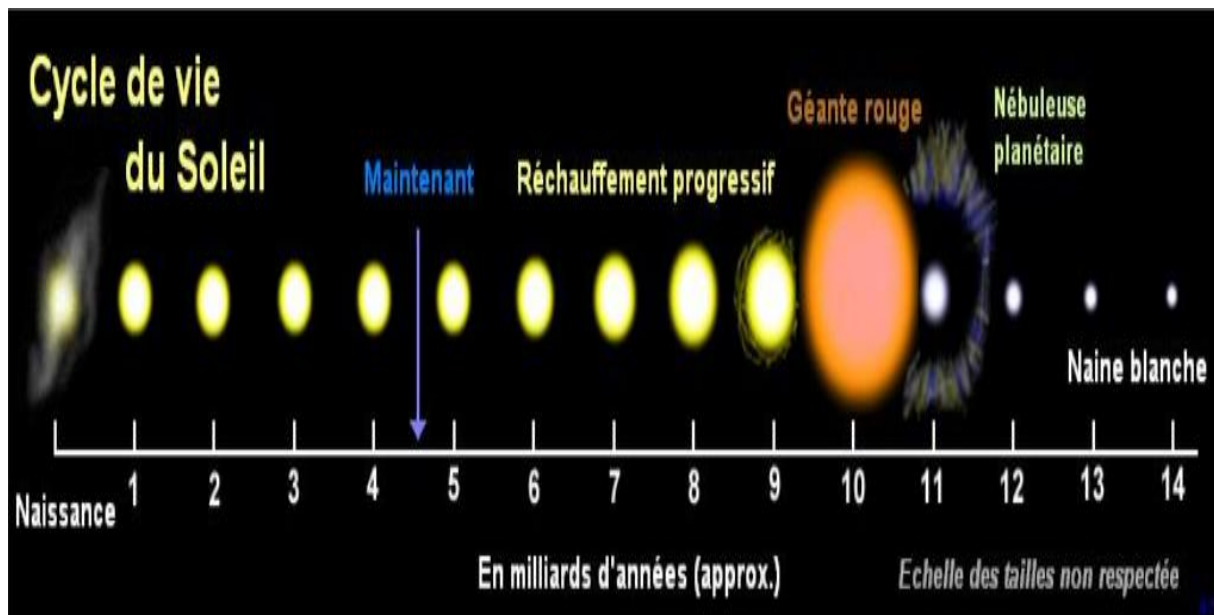


Figure I.2: Cycle de vie du soleil [5]

I.3. Aspects géométriques

I.3.1. Mouvements de la Terre

I.3.1.1. Rotation de la Terre autour d'elle-même

La Terre effectue une rotation sur son axe de l'ouest vers l'est en l'espace de 24 heures. Dans la zone équatoriale, la terre tourne à une vitesse de 1670 kilomètres par heure, ce qui correspond approximativement à 465 mètres par seconde. Cette vitesse diminue cependant avec l'augmentation de la latitude, atteignant 312 mètres par seconde à 50 degrés de latitude, pour finalement disparaître aux pôles.[7]

La rotation de la Terre sur son axe, également appelée mouvement axial, donne lieu à trois phénomènes astronomiques :

- Le jour et la nuit se succédaient.
- Différence de temps sur la surface terrestre basée sur l'heure du lever et du coucher du soleil.
- L'apparition de la force centrifuge centrale ayant entraîné le renflement de la Terre dans la zone équatoriale.

I.3.1.2. Rotation de la Terre autour du soleil

Alors que la Terre effectue une rotation sur elle-même d'ouest en est toutes les 24 heures, elle poursuit également sa course autour du soleil d'ouest en est sur une orbite elliptique s'étendant sur 600 millions de miles. Ce mouvement préserve l'inclinaison de son axe à $23,4388^\circ$ et assure la stabilité de cette inclinaison dans un seul sens. Le parcours de cette ellipse est désigné sous le nom d'écliptique.

La Terre complète son orbite autour du soleil en une durée de 365 jours, 5 heures, 48 minutes et 51 secondes, ce qui équivaut à peu près à 365 jours et un quart. C'est ainsi que nous avons désigné une année.

À cause de l'inclinaison de l'axe terrestre pendant sa révolution autour du soleil, l'angle d'incidence des rayons solaires fluctue d'un lieu à un autre sur la terre au fil des mois, entraînant des variations de température et des changements dans les conditions météorologiques. À savoir, les quatre saisons qui se succèdent de mois en mois : [7]

a) Solstice d'été

Il se produit le 21 juin, quand les rayons solaires atteignent la perpendicularité sur le tropique du cancer dans l'hémisphère nord. Cela signifie que l'extrémité septentrionale de l'axe terrestre est orientée vers le soleil, entraînant l'arrivée de l'été dans l'hémisphère nord avec une prolongation du jour et un raccourcissement de la nuit, tandis que l'hiver s'installe dans l'hémisphère sud, rendant le jour plus court et la nuit plus longue.

b) Equinoxe d'automne

Le 23 septembre commence l'automne, quand les rayons solaires atteignent leur angle perpendiculaire à l'équateur. Par conséquent, l'automne débute dans l'hémisphère nord tandis que le printemps s'installe dans l'hémisphère sud, et la durée du jour est identique à celle de la nuit sur toute la planète.

c) Solstice d'hiver

Le 21 décembre commence l'hiver, lorsque les rayons du soleil deviennent perpendiculaires au tropique du Capricorne dans l'hémisphère sud. Autrement dit, à ce moment-là, l'extrémité nord de l'axe terrestre est orientée loin du soleil tandis que l'extrémité sud y est dirigée. Par conséquent, dans l'hémisphère nord, l'hiver s'installe et les jours deviennent plus courts tandis

que les nuits s'allongent. Tandis que dans l'hémisphère sud, c'est l'été qui arrive et les jours s'étirent alors que les nuits se réduisent.

d) Equinoxe de Printemps

Le 21 mars commence le Printemps, quand les faisceaux solaires sont de nouveau perpendiculaires à l'équateur, entraînant l'arrivée du printemps dans l'hémisphère nord et de l'automne dans l'hémisphère sud, avec une égalité de durée entre la nuit et le jour sur l'ensemble du globe terrestre.

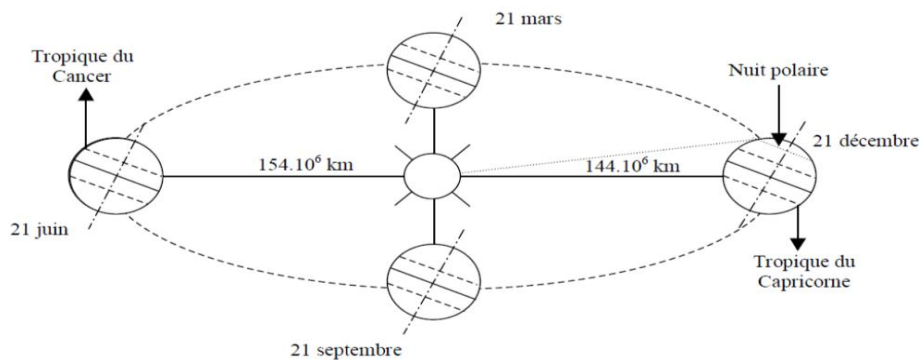


Figure I.3: Représentation des déplacements de la Terre autour du Soleil [7]

I.3.2. Coordonnées célestes

I.3.2.1. Coordonnées géographiques

La Terre est quasiment sphérique et effectue une rotation autour d'un axe qui traverse le pôle Nord et le pôle Sud. Chaque emplacement sur la planète est défini par ses coordonnées de latitude et de longitude. [8]

a) Latitude du lieu φ

L'angle de latitude est la mesure de l'angle formé entre une ligne reliant un point sur la surface terrestre à son centre et le cercle équatorial de la Terre. L'équateur, qui représente une latitude de 0° est la ligne de rencontre entre le cercle équatorial et la surface terrestre. Le pôle nord correspond à une latitude de $+90^\circ$, tandis que le pôle sud se traduit par une latitude de -90° . [8]

b) Longitude (Φ)

La longitude d'un endroit est définie par l'angle entre deux plans méridiens (qui traversent les pôles), l'un servant de référence (le méridien de Greenwich à 0°) et l'autre étant établi en fonction de l'endroit considéré.

La longitude d'un lieu peut également être défini entre -180° et $+180^\circ$, chaque décalage de 1° de longitude correspondant à une différence de 4 minutes dans le temps.

On attribue le signe positif (+) aux méridiens qui se trouvent à l'est de ce méridien, et le signe négatif (-) à ceux situés à l'ouest.

Tlemcen, Algérie se situe à ces coordonnées géographiques :

La latitude (φ) : $34^\circ 52' 41.99''$ Nord

Longitude (Φ) : $-1^\circ 18' 54.00''$ Ouest

Altitude en comparaison au niveau de la mer : 715 mètres. [8]

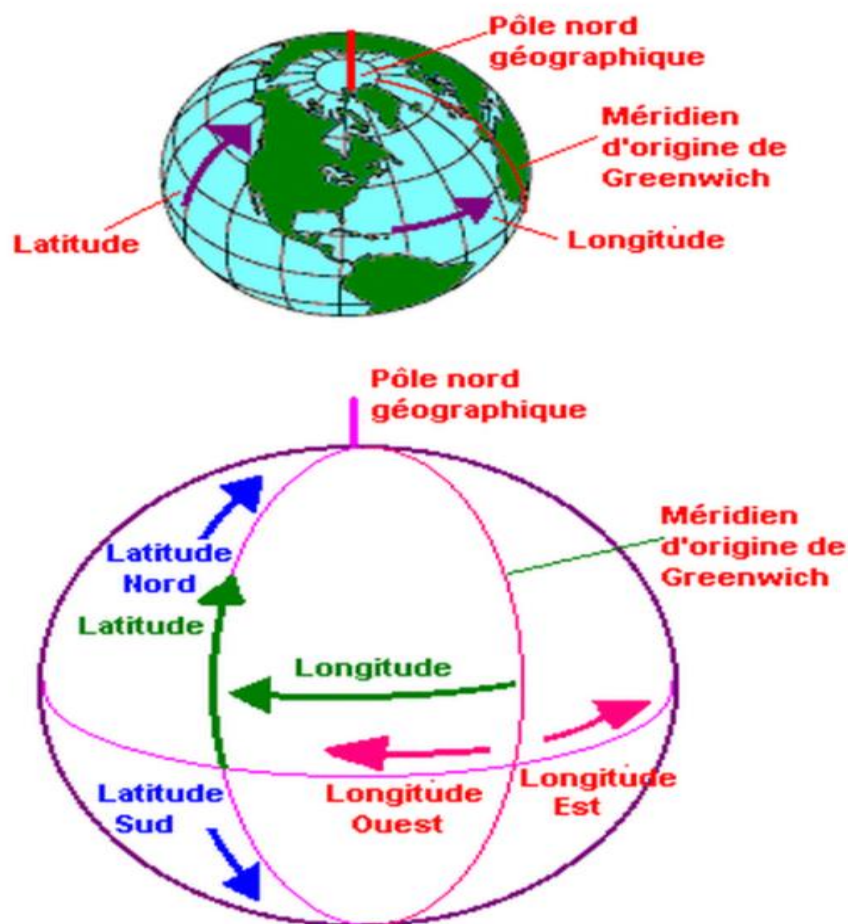


Figure I.4: Longitude et la latitude [7]

I.3.2.2. Coordonnées horaires

a) Déclinaison solaire (δ)

Il s'agit de l'angle formé entre la trajectoire soleil-terre et le plan équatorial terrestre. Elle est nulle lors des équinoxes et maximum lors des solstices, variant de $-23,27^\circ$ au solstice d'hiver à $+23,27^\circ$ au solstice d'été. [9]

Elle est obtenue grâce à la formule ci-après :

$$\delta = 23.45 \sin \frac{(284+N)*360}{365} \quad (\text{I.1})$$

N : le numéro du jour dans l'année débute à partir du premier janvier.

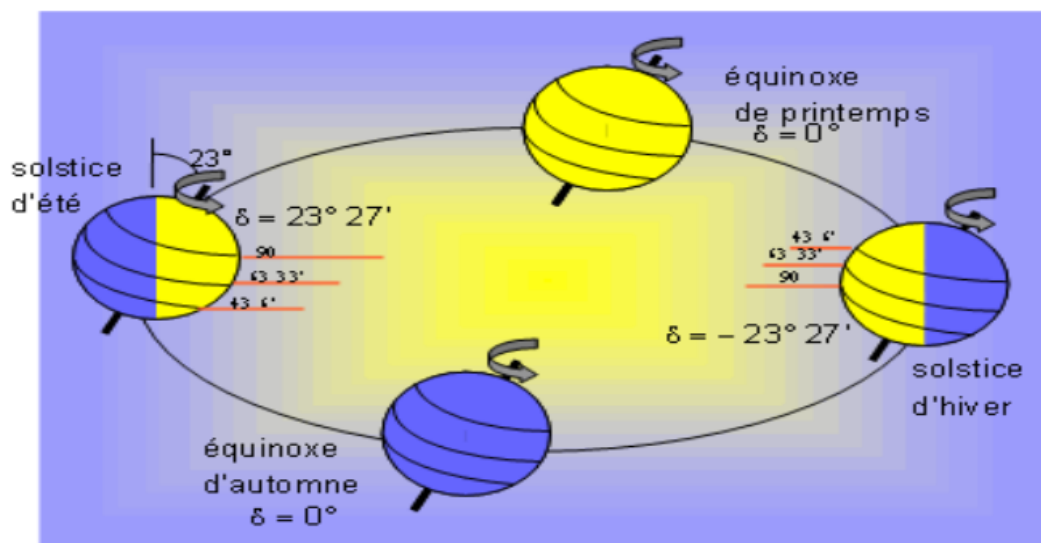


Figure I.5: Variation annuelle de la déclinaison solaire. [5]

b) Angle horaire (ω)

C'est l'angle entre le méridien d'origine qui traverse le pôle sud et la représentation du soleil sur le plan équatorial, ce qui indique la trajectoire du soleil dans le ciel. [8]

Il est défini par :

$$\omega = 15(\text{TVS} - 12) \quad (\text{I.2})$$

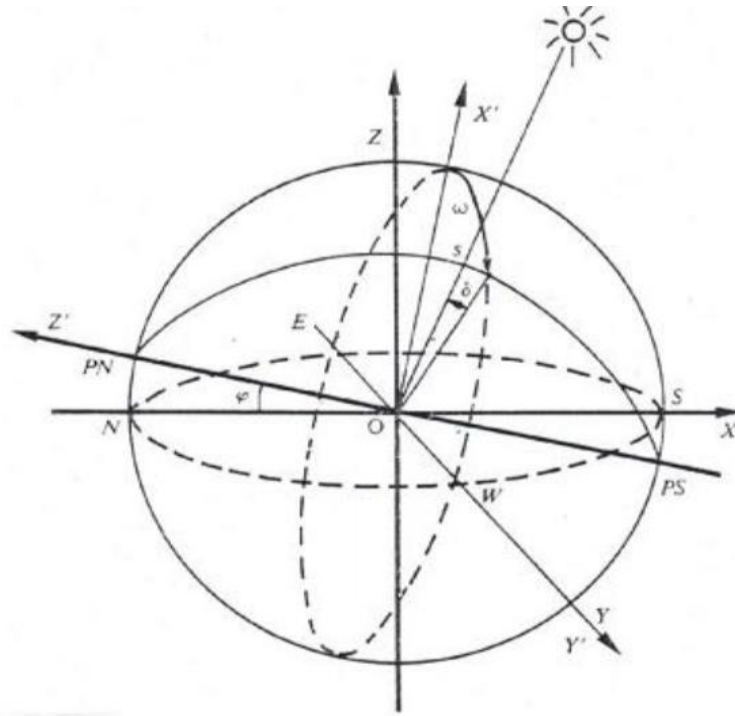


Figure I.6: Repère des coordonnées horaires [9]

I.3.2.3. Coordonnées horizontales

La position du soleil est déterminée par deux angles, (h) et (a), qui indiquent son emplacement par rapport au plan horizontal de l'endroit ayant une latitude (φ). [10]

a) L'azimut solaire (a)

Il s'agit de l'angle mesuré dans le sens des aiguilles d'une montre entre les points cardinaux Sud ou Nord et l'estimation sur le plan horizontal local de la ligne reliant la Terre au Soleil. Dans l'hémisphère nord, l'angle est déterminé dans le sens des aiguilles d'une montre, tandis que dans l'hémisphère sud, il est calculé dans le sens opposé. Ces mesures se basent sur les projections horizontales du point d'observation.

L'azimut solaire est négatif le matin, nul ou égal à 180° à midi et positif l'après-midi, sur tout le globe.

L'azimut géographique est toujours déterminé dans le sens de rotation d'une montre en partant du Nord, sans tenir compte de l'endroit d'où l'on observe. [7]

Il est donné par :

$$\sin(a) = \frac{\cos(\delta) \cdot \sin(\omega)}{\cos(h)} \quad (I.3)$$

b) Hauteur du Soleil (h)

Il s'agit de l'angle formé par la direction du soleil et sa projection sur le plan horizontal. La hauteur du soleil change constamment tout au long de la journée et de l'année selon la formule suivante : [8]

$$\sin (h) = \sin (\varphi) . \sin (\delta) + \cos (\varphi) . \cos (\delta) . \cos (\omega) \quad (\text{I. 4})$$

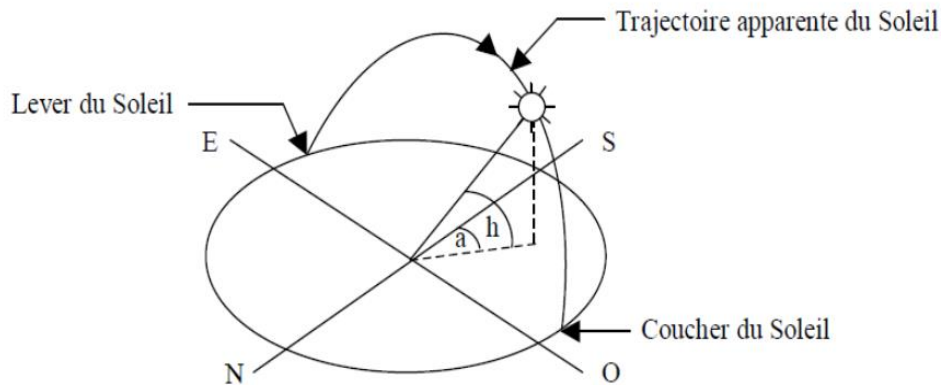


Figure I.7: L'azimut et Hauteur de Soleil. [7]

I.3.3. Temps solaires

I.3.3.1. Temps solaire vrai (TSV)

Le temps solaire vrai, à un moment et un lieu précis, correspond à l'angle horaire du soleil. Ce dernier est indiqué par les cadrans solaires et les héliographes. La formule suivante permet de le déterminer [5] :

$$\text{TSV} = 12 + \frac{\omega}{15} \quad (\text{I. 5})$$

I.3.3.2. Temps solaire moyen (TSM)

On désigne parfois le temps solaire moyen comme étant le temps local. Il est défini par l'équation suivante [5] :

$$\text{TSM} = \text{TSV} - \text{ET} \quad (\text{I. 6})$$

ET : représente l'équation du temps qui ajuste le TSV en fonction du TSM.

$$\text{ET} = 9.87 \sin(2N') - 7.53 \cos(N') - 1.5 \sin(N') \quad (\text{min}) \quad (\text{I. 7})$$

$$N' = (N - 81) \times 360 / 365$$

I.3.3.3. Temps universel (TU)

Le temps universel correspond au temps civil moyen du méridien de Greenwich, également connu sous l'acronyme GMT (Greenwich Mean Time). Est exprimé par la formule suivante [5] :

$$TU = TSM - \frac{\Phi}{15} \quad (I.8)$$

Où : Φ : est la longitude

$\lambda > 0$: pour les villes localisées à l'est de Greenwich.

$\lambda < 0$: pour les villes localisées à l'Ouest de Greenwich.

$\lambda = 0$: $TU = TSM$: Pour les villes localisées au méridien de Greenwich.

I.3.3.4. Temps légal (TL)

Il s'agit du temps officiel d'un État, il est déterminé par [7] :

$$TL = TL + \Delta H \quad (I.9)$$

ΔH : Ceci représente décalage entre le méridien de Greenwich et le pays décalage ($\Delta H = 1$ heure pour l'Algérie).

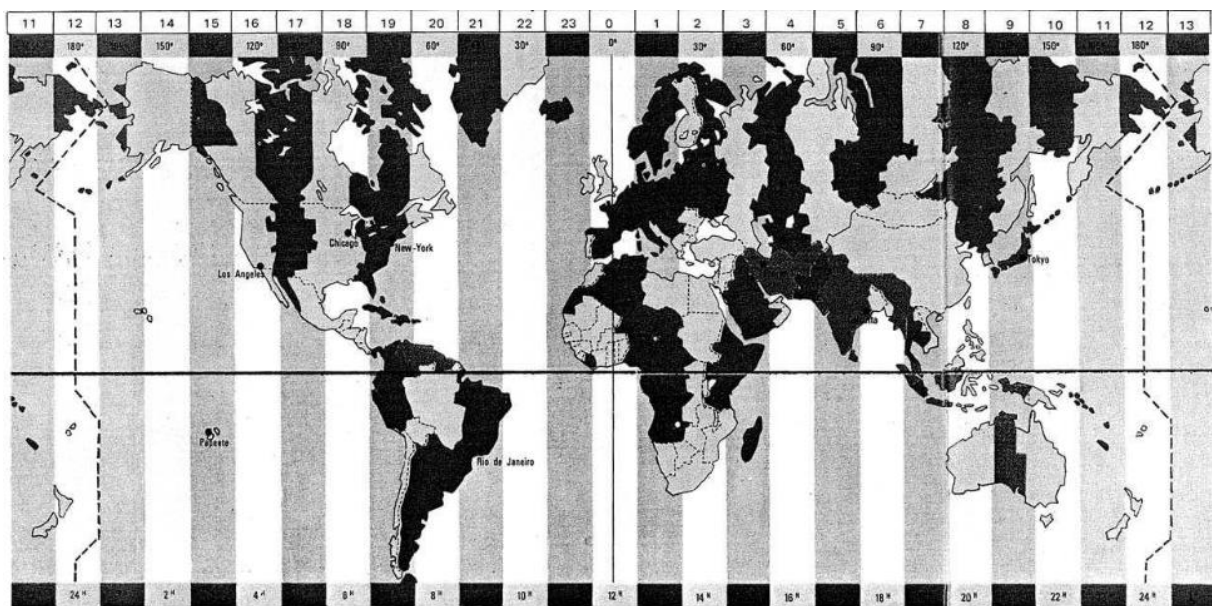


Figure I.8: Décalage horaire par rapport au méridien de Greenwich [11]

I.3.3.5. Constante solaire (I_c)

On appelle constante solaire I_c le flux moyen de rayonnement solaire qui atteint un plan perpendiculaire à la trajectoire des rayons, situé hors de l'atmosphère terrestre.

La valeur moyenne actuellement considérée est $C_0 = 1367 \text{ W/m}^2$.

Cette valeur représente la moyenne annuelle du flux extraterrestre. En réalité, comme l'orbite de la Terre autour du soleil est elliptique, il en résulte une fluctuation saisonnière d'environ $\pm 1.6\%$ de la distance entre la Terre et le soleil, ce qui entraîne une variation de ce flux.[7]

L'expression suivante fournit la valeur ajustée de la constante solaire :

$$I_c = C_0(1 + 0.033) + \cos\left(\frac{360 \cdot N}{365}\right) \quad (\text{I. 10})$$

N : est le numéro du jour dans le mois.

I.3.3.6. Angle d'incidence (θ) :

L'angle d'incidence (θ) définit l'angle qui existe entre la direction perpendiculaire au plan du capteur et la radiation solaire.[7]

Il est exprimé par l'équation suivante [7] :

$$\cos(\theta) = \sin(\varphi - i) \cdot \sin(\delta) + \cos(\varphi - i) \cdot \cos(\delta) \cdot \cos(\omega) \quad (\text{I. 11})$$

Et :

$$\frac{\sin(\theta_1)}{\sin(\theta_2)} = \frac{n_2}{n_1} \quad (\text{I. 12})$$

Où :

θ_1 : angle d'incidence.

θ_2 : angle de réfraction.

n_1 et n_2 : indices réfractifs des deux milieux.

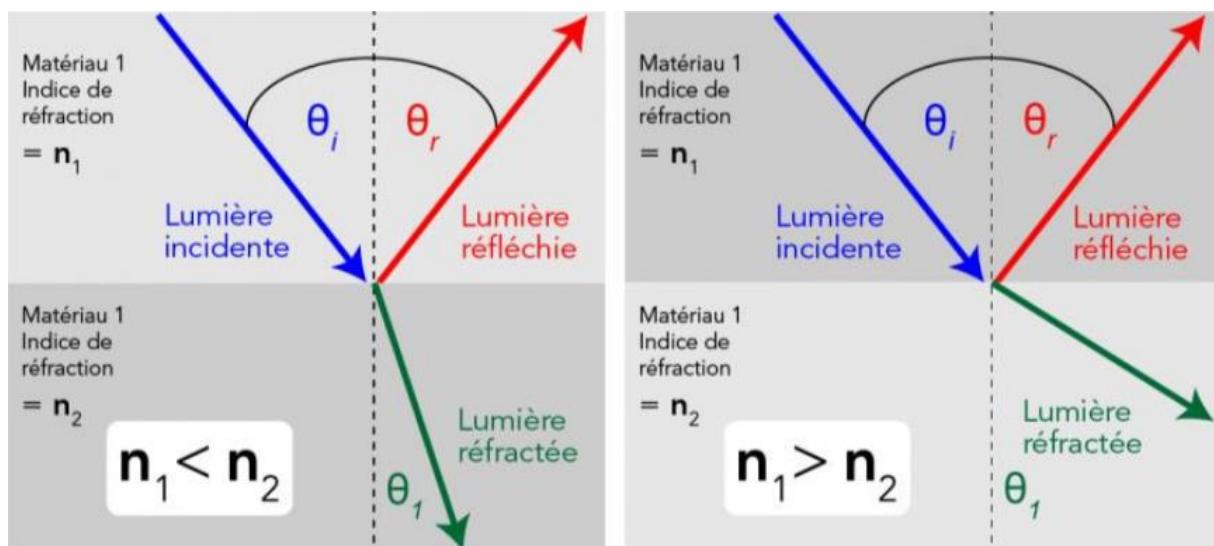


Figure I.9: Angle d'incidence.[7]

Tableau I.2: Indice de réfraction moyen n dans le spectre solaire de certains [7]

Matériau de couverture	n
Verre	1.526
Poly méthacrylate de méthyle	1.49
Polycarbonate	1.60

I.4. Aspects énergétiques

I.4.1. Rayonnement solaire

Le soleil génère une énergie colossale grâce à des réactions de fusion thermonucléaire. Cette énergie, connue sous le nom de rayonnement solaire, est la source principale pour la majorité des énergies présentes sur notre planète. Elle peut également être utilisée pour générer de l'électricité. L'énergie solaire voyage à travers l'espace sous forme de quanta ou grains d'énergie, appelés photons, et elle se renouvelle constamment.

I.4.1.1. Composante du rayonnement solaire :

La lumière émise par le soleil provient de sa surface externe, atteignant une température d'environ 6000K. À cette température, environ 40% de l'énergie est libérée sous forme de lumière visible, couvrant des longueurs d'onde de $0,3\mu\text{m}$ (allant du violet au bleu) à $0,7\mu\text{m}$ (rouge). Pour décomposer ce rayonnement solaire, on peut diriger un faisceau lumineux à travers un prisme de verre ou un réseau de diffraction. Cela révèle une gamme complète de couleurs, allant du bleu au rouge, en passant par le vert et le jaune. Chaque couleur correspond à une longueur d'onde spécifique du rayonnement.

Aux alentours de 1800, William Herschel, tout en explorant le rayonnement solaire, réalisa une expérience fascinante avec un prisme et un thermomètre. En plaçant le thermomètre derrière le prisme, il observa une hausse de température, signe que de l'énergie était reçue, non seulement dans le spectre visible, mais aussi dans une zone située au-delà du rouge. C'est alors qu'il découvrit le rayonnement infrarouge, qui constitue 50% de l'énergie émise par le soleil. Par ailleurs, 10% du rayonnement solaire total est émis dans l'autre extrémité du spectre visible, à des longueurs d'onde inférieures à celles de la lumière violette, connues sous le nom d'ultraviolet. [7]

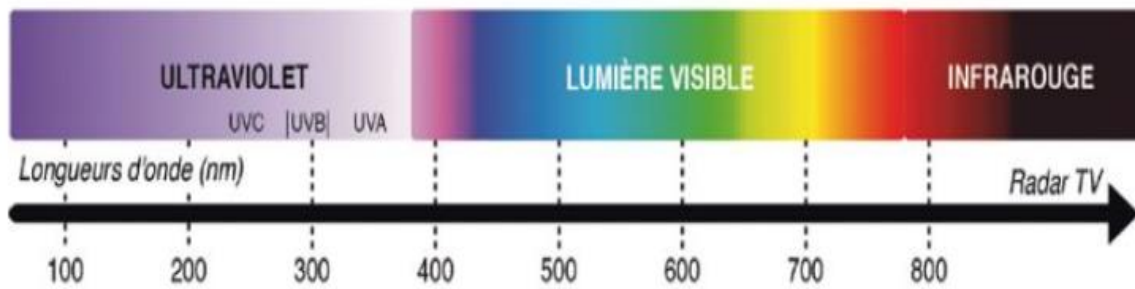


Figure I.10: La longueur d'onde de rayonnement solaire. [7]

I.4.1.2. Différents types de rayonnement solaire :

a) **Rayonnement direct**

Le rayonnement direct est la radiation qui arrive sur un plan précis, provenant d'un petit angle solide centré sur le disque solaire. Il se propage en ligne droite par temps clair. Deux coefficients, a et b, déterminent l'état du ciel en représentant la turbulence atmosphérique à l'endroit où est placé le capteur solaire. On nomme pyrhéliomètre l'appareil qui sert à mesurer ce genre de rayonnement. [6]

La transmissivité totale de l'atmosphère pour le rayonnement solaire direct incident est fournie par : [7]

$$\tau_{\text{dir}} = a * e^{\frac{-p*b}{1000*h}} \quad (\text{I. 13})$$

Où :

a et b : coefficients traduisant les troubles atmosphériques.

h : hauteur du soleil.

P : pression atmosphérique du lieu.

Tableau I.3: Coefficients de trouble. [12]

	Ciel pur	Conditions normales	Zones industrielles
a	0.87	0.88	0.91
b	0.17	0.26	0.43

Tableau I.4: Variation de la pression atmosphérique avec l'altitude.[7]

Altitude (m)	0	500	1000	1500	2000	5000
P (mbar)	1000	950	900	850	800	500

Le rayonnement direct reçu sur un plan horizontal est donné par :

$$I_{\text{dir h}} = C_0 * \tau_{\text{dir}} \quad (\text{I. 14})$$

$I_{\text{dir h}}$: éclairement énergétique direct reçu sur un plan horizontal.

$$I_{\text{dir}} = I_{\text{dir h}} * \cos(\theta) \quad (\text{I. 15})$$

θ : Angle d'incidence des rayons solaires.

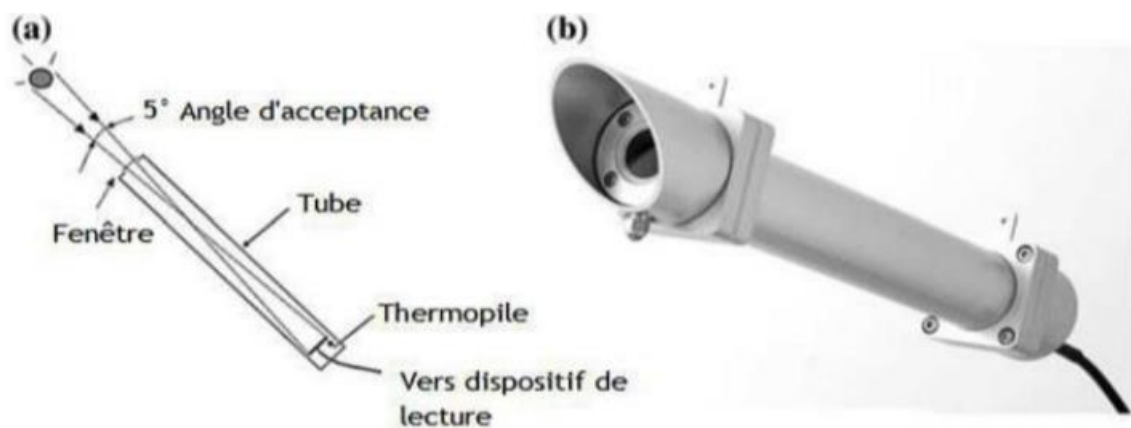


Figure I.11: Le pyréliomètre.[13]

b) Rayonnement diffus

On définit le rayonnement diffusé comme le rayonnement qui a été dispersé dans l'atmosphère. Cela se produit lorsque le rayonnement rencontre de petites entités dans l'atmosphère, comme des gouttes d'eau, des particules atmosphériques, des cristaux de glace ou des aérosols, entraînant ainsi la diffusion du rayonnement solaire dans diverses directions. Il s'agit de la radiation émanant de l'ensemble du ciel, à l'exception du disque solaire. C'est la radiation de l'atmosphère dont la longueur d'onde s'étend de 0,3 à 5 microns, captée sur une surface horizontale.

Les molécules d'air sont nettement plus petites que les longueurs d'onde de la lumière visible qui les touche. Ainsi, les longueurs d'onde bleues et plus courtes de la lumière se diffusent

davantage que les longueurs d'onde rouges et plus longues. Voilà pourquoi le ciel nous semble bleu durant la journée. L'instrument qui mesure ce type de rayonnement est appelé pyranomètre. [13]



Figure I.12:Pyranomètre. [14]

La relation entre le coefficient de transmission du flux direct et diffus est [5] :

$$\tau_{\text{dif}} = 0.271 - 0.2939 * \tau_{\text{dir}} \quad (\text{I. 16})$$

Le flux diffus reçu sur un plan horizontal est défini par :

$$I_{\text{dif h}} = C_0 * \sin(h) * \tau_{\text{dif}} \quad (\text{I. 17})$$

Le flux diffus reçu sur un plan incliné est défini par :

$$I_{\text{dif}} = I_{\text{dif 1}} + I_{\text{dif 2}} \quad (\text{I. 18})$$

$$I_{\text{dif 1}} = I_{\text{dif h}} * \frac{1 + \cos(i)}{2} \quad (\text{I. 19})$$

$$I_{\text{dif 2}} = \text{alb} * \frac{1 + \cos(i)}{2} * (I_{\text{dif h}} * \sin(h) + I_{\text{dif h}}) \quad (\text{I. 20})$$

$I_{\text{dif 1}}$ et $I_{\text{dif 2}}$: Rayonnements diffusés par le ciel et par le sol respectivement.

alb : albédo du sol.

i : angle d'inclinaison du plan du capteur par rapport à l'horizontale.

c) L'albédo (alb)

L'albédo du sol correspond à la radiation qui est réfléchi par le sol ou par des éléments présents à sa surface. Cet albédo peut jouer un rôle significatif lorsque le sol possède une grande capacité de réflexion (comme dans le cas de l'eau ou de la neige). Un corps noir, par définition, a un albédo de zéro. [8]

$$\text{alb} = \frac{\text{énergie réfléchie}}{\text{énergie reçue}} \quad (\text{I. 21})$$

Tableau I.5:Albédo solaire de différentes surfaces. [7]

Type de surface	Albédo
Surface de lac	0,02 à 0,04
Forêt de conifères	0,05 à 0,15
Forêt tropicale	0,12
Herbe verte	0,25
Sable léger et sec	0,25 à 0,45
Sol sombre	0,05 à 0,15
Glace	0,30 à 0,40
Mer chaude	0,05
Mer froide	0,15
Neige tassée	0,60
Neige fraîche	0,85
Nuage	0,86
Verre à vitres	0.10

d) Rayonnement global

Le rayonnement global (I_c) est la somme des rayonnements diffus et direct

$$I_c = I_{\text{dif}} + I_{\text{dir}} \quad (\text{I. 22})$$

I.5. Corps noir

Un corps noir est, par définition, un objet théorique qui absorbe complètement la lumière et émet parfaitement un rayonnement thermique. On considère que la radiation électromagnétique absorbée par les parois de ce corps est en équilibre thermique. Tous les photons sont constamment absorbés, indépendamment de leur longueur d'onde, et les photons réémis présentent une distribution spectrale qui dépend uniquement de la température des parois de ce corps noir. [7]

I.6. Gisement solaire

L'ensemble de données du gisement solaire retrace la progression du rayonnement solaire accessible sur une période spécifique. On l'utilise pour simuler le fonctionnement d'un système énergétique solaire et réaliser un dimensionnement aussi précis que possible en tenant compte de la demande à satisfaire [14].

En raison de sa localisation, l'Algérie bénéficie d'une immense ressource solaire, comme le révèle la figure I.13 :

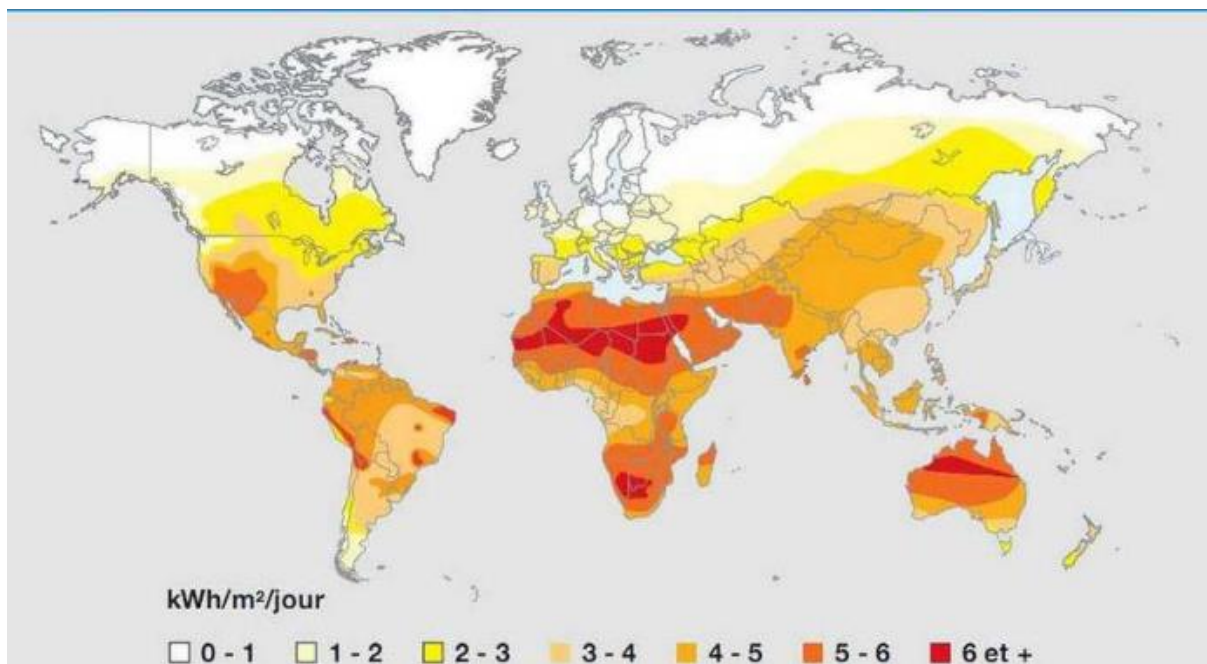


Figure I.13: Carte du monde de l'ensoleillement moyen annuel.[5]

Selon une analyse effectuée par satellites, l'Agence Spatiale Allemande (ASA) a déterminé que l'Algérie possède le plus grand potentiel solaire de l'ensemble du bassin méditerranéen, avec une capacité de 169 000 TWh/an pour l'énergie solaire thermique et de 13,9 TWh/an pour l'énergie photovoltaïque. Ce potentiel équivaut à la découverte de dix immenses gisements de gaz naturel dans la région de Hassi R'Mel. Le tableau illustre la distribution de ce potentiel

solaire à travers les différentes zones climatiques de l'Algérie, en fonction de l'ensoleillement annuel reçu : [11]

Tableau I.6: La répartition du potentiel solaire par région climatique au niveau

Régions	Régions côtières	Hauts plateaux	Sahara
Superficie (%)	4	10	86
Durée moyenne d'ensoleillement (h/an)	2650	3000	3500
Energie moyenne reçue (KWh/m ² /an)	1700	1900	2650

Le Sahara algérien bénéficie d'environ 3500 heures d'ensoleillement par an, ce qui en fait le plus élevé au monde. Son ensoleillement dépasse constamment les 8 heures par jour et peut atteindre jusqu'à 12 heures par jour, sauf dans l'extrême sud où il descend à environ 6 heures par jour pendant l'été.

L'Adrar est une région de l'Algérie qui bénéficie d'un ensoleillement maximal et offre le potentiel le plus important de l'ensemble de l'Algérie. [7]

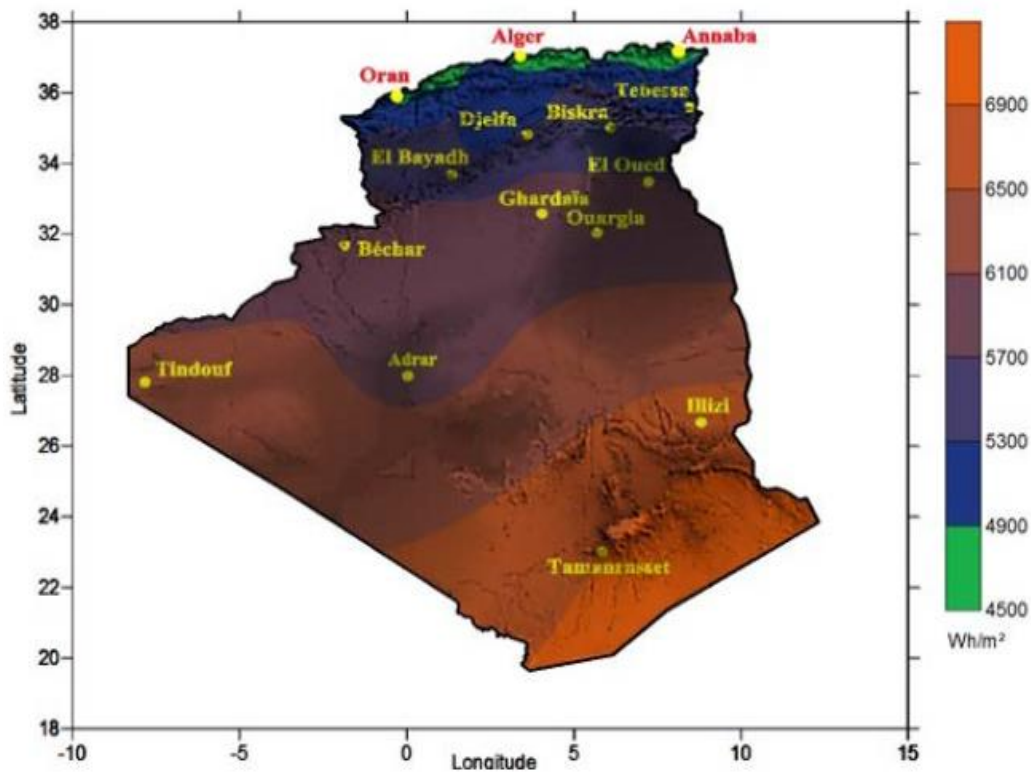


Figure I.14: Moyenne annuelle de l'irradiation solaire globale reçue sur un plan incliné à la latitude. [5]

En Algérie, on trouve un réseau de 78 stations météorologiques de l'O.N.M réparties à travers l'ensemble du pays. Toutefois, seulement 7 de ces stations sont équipées pour mesurer les composantes diffusées et globales du rayonnement solaire sur un plan horizontal. Cela est principalement dû à la fiabilité limitée des instruments de mesure ou au coût prohibitif de ces équipements. En revanche, la durée d'ensoleillement est mesurée dans la plupart des stations de l'O.N.M grâce à un héliographe, qui est privilégié en raison de sa simplicité d'utilisation. [5]

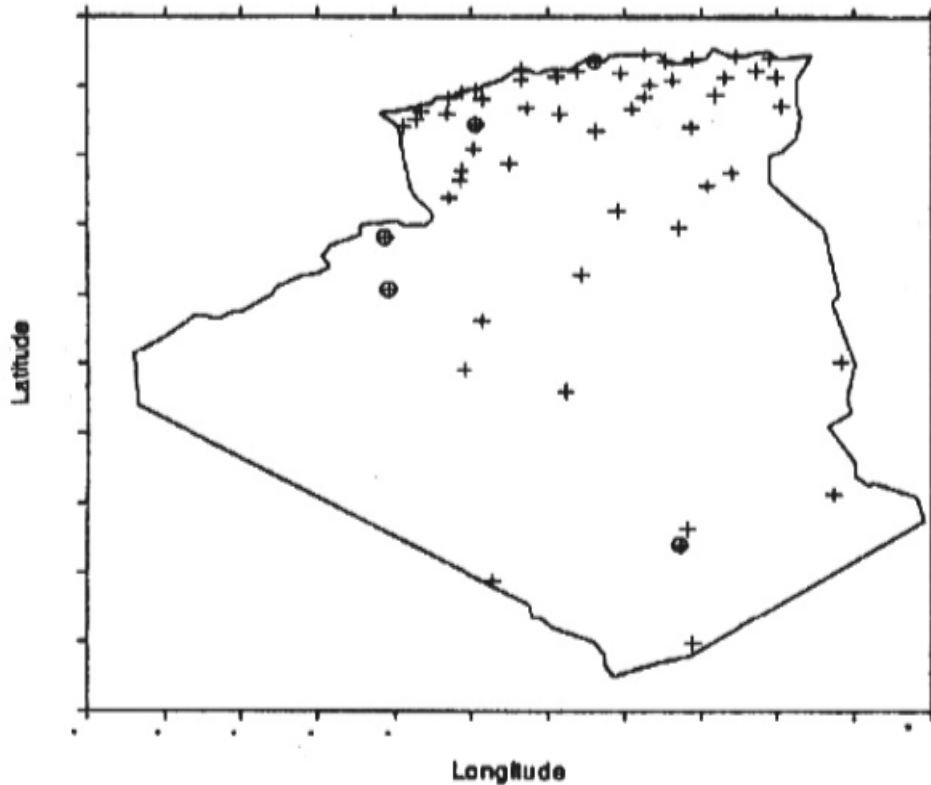


Figure I.15: Répartition territoriale des stations météorologiques en ALGERIE. [6]

I.7. Conclusion

Ce chapitre propose un résumé des concepts de base liés à l'exploitation de l'énergie solaire. Une compréhension approfondie de ces notions, notamment du rayonnement solaire global au sol, est essentielle pour utiliser efficacement les capteurs et concentrateurs solaires à des fins énergétiques.

L'énergie solaire, qui arrive en abondance sur notre planète à un niveau dépassant de plus de 15 000 fois la consommation énergétique mondiale, peut être exploitée de trois manières principales : thermique, thermodynamique et photovoltaïque.

En Algérie, on trouve un vaste potentiel solaire qui reste largement sous-utilisé. Cette source d'énergie se révèle particulièrement avantageuse pour la conversion thermique, que ce soit pour le chauffage ou la production d'électricité. Elle est non seulement accessible et économique, mais aussi respectueuse de l'environnement et requiert peu d'entretien. [7]

Chapitre II : Capteurs solaires plans

II.1. Introduction

De nos jours, il est très important de réduire l'utilisation des énergies fossiles et d'exploiter les énergies renouvelables. Parmi les ressources renouvelables, il y a les capteurs solaires plans qui représentent une solution innovante et durable pour exploiter l'énergie solaire. Les capteurs solaires plans ont connu de grands progrès technologiques et en termes d'efficacité au cours des dernières décennies. À l'heure actuelle, les capteurs solaires plans sont couramment utilisés à travers le monde, que ce soit dans les zones ensoleillées ou dans celles où l'exposition au soleil est plus modérée. Grâce à leur polyvalence et leur capacité d'adaptation, ils constituent un outil indispensable pour les systèmes de chauffage solaire, les piscines chauffées, ainsi que pour diverses applications agricoles ou industrielles.

II.2. Définition

Les capteurs solaires plans sont les éléments essentiels dans les installations solaire. Ils sont utilisés pour capter l'énergie solaire reçue par rayonnement et transformer en chaleur exploitable via un fluide caloporteur (gaz ou liquide) [13]. Ils sont composés d'un absorbeur qui capte le rayonnement solaire, d'une couverture transparente pour conserver la chaleur, d'un isolant pour minimiser les pertes thermiques, et d'un coffre conçu pour protéger tous les éléments.

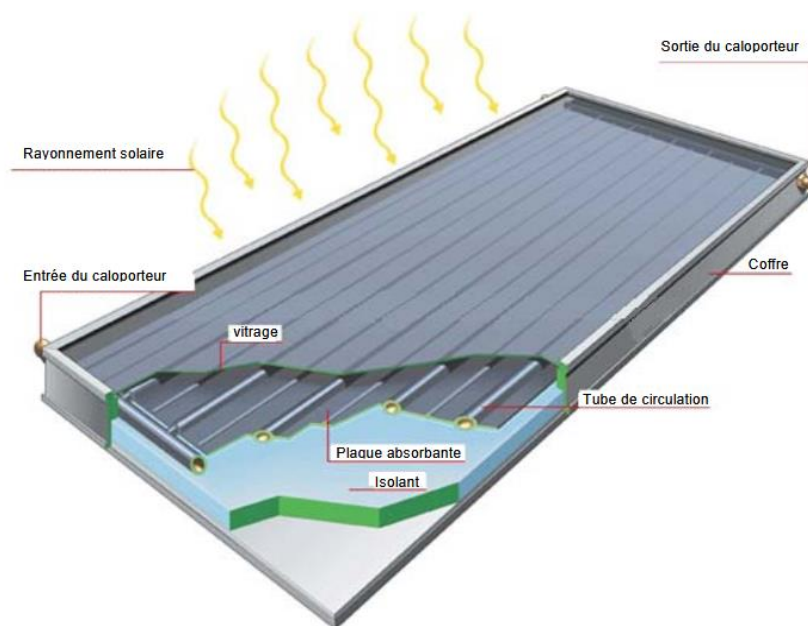


Figure II.16 : capteur solaire plan [15]

II.3. Principe de fonctionnement

Il s'agit de capturer l'énergie fournie par le rayonnement solaire en minimisant les pertes.

Un rayonnement solaire pénètre à travers la couverture transparente et chauffe l'absorbeur situé derrière cette vitre. Par conséquent, le rayonnement produit par cet élément est piégé, car il ne peut pas passer à travers la vitre. Ainsi, la chaleur est retenue entre l'absorbeur et le revêtement : c'est ce qu'on appelle l'effet de serre.[16]

II.3.1. Effet de serre

L'effet de serre est une notion fréquemment exploitée pour la conversion thermique à basse température du rayonnement solaire, souvent désignée sous le terme « effet de serre ». Toute modification apportée à l'équilibre énergétique et thermique d'un corps récepteur (par exemple, le sol). Par l'installation d'un couvercle de verre, qui laisse passer le rayonnement solaire mais bloque le rayonnement terrestre. La présence à la vitre permet d'absorber complètement le rayonnement provenant du récepteur et d'émettre depuis ses deux côtés, selon sa propre température.

On associe généralement l'effet de serre uniquement à la notion de changement des échanges radiatifs entre le récepteur et l'atmosphère, bien que son efficacité par rapport aux pertes par convection soit souvent similaire. Il ne fait qu'amoindrir l'énergie solaire présente sur le récepteur, bien au contraire, elle se réduit. L'effet de serre a pour principal résultat d'augmenter la température d'équilibre maximale du récepteur. Le vitrage à effet de serre se révèle particulièrement bénéfique chaque fois que les pertes par rayonnement surpassent les autres, c'est-à-dire lorsqu'on recherche des températures assez hautes au niveau du récepteur [16].

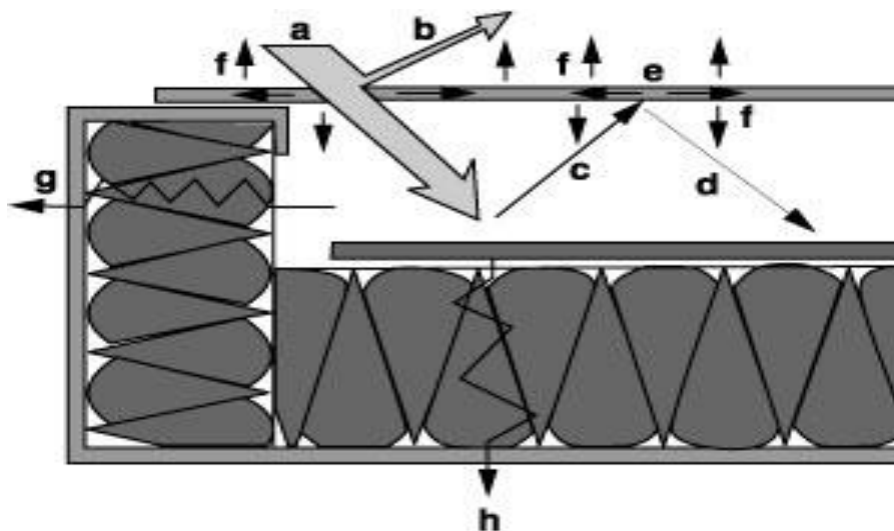


Figure II.17: Schéma montrant le principe de l'effet de serre [3]

Avec :

- a:** Rayonnement solaire incident.
- b:** Rayonnement réfléchi par le vitrage (couverture transparente).
- c:** Rayonnement thermique émis par l'absorbeur.
- d:** Rayonnement thermique réfléchi par le vitrage.
- e :** Rayonnement thermique absorbée par le vitrage.
- f :** Rayonnement thermique émis par le vitrage.
- g, h :** perte thermique latérale et inférieures par l'isolation et le cadre.

II.4. Composantes d'un capteur solaire plan

II.4.1. Absorbeur

Dans un capteur solaire plan, l'élément le plus crucial est l'absorbeur, son rôle est de capter le maximum de radiation solaire possible et transmet la chaleur générée au fluide caloporteur de chaleur avec un minimum de déperdition [12]. Il est généralement constitué d'une plaque métallique très conductrice (cuivre, aluminium ou acier), cela permet de transférer de manière efficace la chaleur recueillie vers le fluide caloporteur de chaleur [15]. Il intègre dans la plaque des tubes à travers lesquels circule le fluide caloporteur.

Le tableau II.1 présente les propriétés de différents métaux qui pourraient servir d'absorbeurs :

Tableau II.7 : Caractéristiques des matériaux utilisés comme l'absorbeur [17]

Matière	Conductibilité (W/m °C)	Coefficient de dilatation (10^{-5} K^{-1})
Aluminium	230	2.38
Cuivre	380	1.65
Zinc	112	2.9
Acier	52	1.15
Inox	52	1.15
Plastiques	0.2-0.4	7-20

Pour diminuer les pertes et optimiser son rendement, on utilise souvent une couche sélective (ou revêtement sélectif) appliquée sur la surface de l'absorbeur. Cette couche est élaborée dans le but d'améliorer deux propriétés essentielles :

- coefficient d'absorption α : le rapport du rayonnement lumineux absorbé par le rayonnement lumineux incident.
- coefficient d'émission ε : le rapport entre l'énergie rayonnée dans l'infrarouge lorsque l'absorbeur est chaud et celle qu'un corps noir rayonnerait à la même température.

L'objectif de ce revêtement est d'accroître l'absorptivité et de réduire l'émissivité dans le but de conserver un maximum d'énergie [18].

Le tableau II.2 présente les types de revêtements les plus fréquemment utilisés.

Tableau II.8: Revêtements des surfaces d'absorbeur [17]

Revêtement	Absorption	Emission
Peinture noire	0.92 à 0.97	0.95
Chrome noir sur cuivre (sélectif)	0.95	0.14
Chrome noir sur acier (sélectif)	0.91	0.07
Tinox (sélectif)	0.95	0.05

L'absorbeur devrait posséder les propriétés suivantes :

- Un coefficient d'absorption élevé.
- Une bonne conductivité thermique.
- Une excellente tolérance à la corrosion.



Figure II.18 : Exemples des absorbeurs [15]

II.4.2. Fluide caloporteur

Un fluide caloporteur est un gaz ou un liquide utilisé pour transférer la chaleur d'un emplacement à un autre dans une installation thermique.

Dans un capteur solaire, le fluide caloporteur (ou calorporteur) sert d'intermédiaire pour libérer la chaleur accumulée par l'absorbeur et à la transmettre vers le système de stockage ou l'endroit où elle sera utilisée [19].

Pour assurer son efficacité, un fluide caloporteur doit avoir plusieurs caractéristiques essentielles : [19]

- Être chimiquement stable à des températures élevées, particulièrement lors de l'arrêt du capteur
- Présenter des propriétés antigel qui correspondent aux conditions météorologiques locale.
- Posséder des qualités anticorrosives en fonction des matériaux présents dans le circuit du capteur afin de prévenir les dommages aux éléments du système, tels que les canalisations et les échangeurs.
- Avoir une capacité thermique spécifique élevée et une conductivité thermique importante pour transporter une grande quantité de chaleur avec un faible volume.
- Être non-toxique et ininflammable pour une utilisation sans risque et avoir un impact environnemental minimal.
- Présenter une faible viscosité pour simplifier son déplacement tout en minimisant les besoins en pompage.

- Être aisément accessible et économique.

L'option des fluides caloporteurs s'adapte selon les exigences particulières de chaque utilisation.

Parmi les fluides couramment utilisés :

- **L'eau** : Un excellent fluide caloporteur en raison de sa grande chaleur spécifique, de sa disponibilité et de son coût modique. Cependant, le danger de gel pendant les nuits d'hiver et le risque d'ébullition en cas des températures élevées posent des problèmes. [20]
- **Les gylthermes** : Les liquides organiques dérivés de poly-phényles hydrogénés ou d'hydrocarbures linéaires, traités pour éviter les mêmes défauts que l'eau, ont une capacité thermique massique de 0,5Kcal/Kg.K. Ces hydrocarbures se dégradent lorsqu'ils sont exposés à des résidus d'eau ou d'air et combustibles à des températures élevées. [21]
- **L'air** : L'air, en tant que vecteur de chaleur, présente un avantage considérable grâce à sa disponibilité et son coût nul. De plus, l'absence de problèmes tels que le gel et la corrosion contribue à prolonger la longévité des capteurs tout en réduisant les besoins en maintenance.

Toutefois, pour acheminer une quantité significative d'énergie, il est nécessaire de recourir à d'importants volumes d'air. [9]

Toutefois, ces fluides, que l'on désigne ultérieurement comme fluides conventionnels, présentent aussi des restrictions d'usage qui demeurent inaltérables puisqu'elles correspondent aux caractéristiques physico-chimiques immuables propres à chaque fluide. Cela a donné lieu à la création de nanofluides et de nanofluides hybrides, où l'on peut altérer ces caractéristiques en intégrant des nanoparticules de types et formes variés.

II.4.3. Couverture transparente

Pendant l'opération thermique d'un capteur solaire plan, la couverture transparente est cruciale pour générer l'effet de serre. Pour ce faire, elle doit transmettre autant que possible le rayonnement solaire incident et absorber (ou réfléchir dans le cas des couvertures transparentes appelées sélectives) les rayons infrarouges émis par l'absorbeur. Elle doit également créer une couche d'air stagnante au-dessus de l'absorbeur pour restreindre les transferts convectifs. Ainsi, paradoxalement, la couverture transparente génère un réchauffement de l'absorbeur via l'effet de serre, tout en étant la source des pertes thermiques les plus significatives du panneau solaire par le biais de la réémission des rayons infrarouges.

Ses propriétés fondamentales seront donc ses qualités optiques et sa résistance physique. Il est attendu d'elles qu'elles montrent un coefficient de transmission énergétique élevé de 0,3 à 2,2 microns, c'est-à-dire sur la plage du spectre solaire, et une opaque totale pour les infrarouges lointains, de 4 à 30 μ , c'est-à-dire pour les longueurs d'onde d'émission du corps noir correspondant à des températures variant de 100 °C à -20 °C (en prenant en compte l'étendue des spectres).

D'autre part, elles devront offrir une résistance adéquate aux impacts et aux contraintes mécaniques, qui peuvent résulter de variations de pression ou simplement de dilatations différentielles.

On privilégie souvent le verre pour les protections de capteurs solaires en raison de ses caractéristiques optiques. Toutefois, pour garantir sa résistance aux chocs en fonctionnement, il est parfois nécessaire d'avoir une épaisseur importante (4 voire 6 mm) ou d'appliquer des traitements spécifiques (comme la trempe). Deux défauts principaux subsistent à l'utilisation du verre : son poids et les dangers de bris accidentel pendant le transport, la manipulation ou lors de l'installation.

C'est pour cette raison que de nombreux producteurs de capteurs solaires se tournent vers l'utilisation de plastiques, qui sont moins lourds et plus résistants. Toutefois, bien que le verre puisse être vu comme un matériau de référence en matière de vieillissement, l'utilisation de matériaux polymériques requiert une analyse approfondie de leur pérennité. [9]

À l'heure actuelle, les trois types de plastiques employés en tant que couvertures sont :

- Le polyméthacrylate (PMMA) : est un thermoplastique transparent parfois appelé verre acrylique, chimiquement, c'est le polymère synthétique de méthacrylate de méthyle. [22]
- Le polycarbonate (PC) : Ces produits sont des dérivés de plastique à double et triple lame très mince, connectés par une multitude de parois pour créer des cavités alvéolaires. Ces cavités diminuent le déplacement de l'air contenu dans cet espace et permettent de réduire les pertes thermiques par convection vers l'avant. C'est le type de couvertures que ton autre laboratoire utilise. Leur indice de transmission de la lumière solaire, qui est d'environ 83% lorsqu'ils sont neufs et exposés à une incidence normale, tend cependant à diminuer légèrement avec le temps (79% après cinq ans). L'effet de

serre est indiscutablement plus efficace avec des couvertures en verre transparent, surtout si l'on utilise des plaques alvéolaires à double paroi.

Comparativement aux verres, les polycarbonates ont l'avantage de montrer une forte résistance au choc thermomécanique. [7]

- Le polyester renforcé aux fibres de verre (PRV) : Le PRV est un matériau composite thermodurcissable, essentiellement composé de résine de polyester insaturé, qui est renforcé par des fibres de verre et chargé en agrégats. La résine polyester sert de liaison entre les divers éléments. [22]

Le tableau II.3 regroupe les propriétés de différentes surfaces transparentes.

Tableau II.9: Propriétés de différentes couvertures transparentes [22]

Matière	Réflexion	Épaisseur (mm)	Transmittance $\lambda=0.4\div 2.5\mu\text{m}$	Transmittance $\lambda=2.5\div 40\mu\text{m}$	Chaleur massique (KJ/Kg. K)	Masse volumique (kg/m ³)
Verre	1.518	3.175	0.840	0.020	0.754	2489
Fibre de verre polyester renforcé	1.540	6.350	0.870	0.076	1.465	1399
Fibre acrylique (plexiglass)	1.490	3.175	0.900	0.020	1.465	1189
Polycarbonate (lexan)	1.586	3.175	0.840	0.020	1.193	1199
Polytétrafluoroéthylène (teflon)	1.343	5.080	0.960	0.0256	1.172	2480
Fluorure de	1.460	1.016	0.920	0.07	1.256	1379

polyvinyle (Tedlar)						
Polyster (mylar)	1.460	1.270	0.870	0.178	1.046	1394
Fluorure de polyvinylidène (Kynar)	1.413	1.016	0.930	0.230	1.256	1770
Polyéthylène	1.500	1.016	0.920	0.810	2.302	910

II.4.4. Isolation thermique

Pour maximiser l'efficacité du capteur, il est essentiel de minimiser les pertes de transmission vers l'extérieur. [23]

Il existe plusieurs matériaux isolants qui peuvent être appropriés pour l'isolation des capteurs. Cependant, il est crucial de surveiller la température, car une interruption du flux du fluide caloporteur peut entraîner une élévation de la température interne du capteur à plus de 150 degrés. On utilise généralement la laine de verre et les mousses polyuréthanes comme matériaux d'isolation. Ils ont une épaisseur qui va de 4 à 8 cm. [24]



Figure II.19 : Isolation thermique [25]

Un bon isolant doit posséder les caractéristiques suivantes :

- Une conductivité thermique réduite.
- Une densité réduite.
- Il faut que la chaleur massique soit faible.
- Une résistance thermique dans la plage des températures opérationnelles.

On identifie trois catégories d'isolants : [24]

II.4.4.1. Isolants minéraux

La laine de verre, composée de fibres de verre extrêmement fines, se présente sous diverses formes : en plaques, en rouleaux et recouverte de plâtre. Sa conductivité diminue de $0,034 \text{ Wm}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ à 0°C pour atteindre $0,053 \text{ Wm}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ à 200°C . Également désignée comme mica, la vermiculite est un matériau dont la conductivité peut fluctuer entre $0,12$ et $0,60 \text{ Wm}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$. Elle se présente sous forme de petites granules très légères. [24]

II.4.4.2. Isolants naturels

La conductivité thermique du bois sec varie entre $0,13$ et $0,4 \text{ Wm}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$. Cependant, en le transformant en fibres agglomérées, ses capacités isolantes peuvent être renforcées ($\lambda = 0,05 \text{ Wm}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ à $0,10 \text{ Wm}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$). La sciure de bois ($\lambda = 0,11 \text{ Wm}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$), présente deux désavantages : sa capacité à s'enflammer et sa conductivité qui a tendance à croître avec la chaleur, ce qui la rend inappropriée pour l'isolation thermique. [24]

II.4.4.3. Isolants organiques

Les plastiques sont de mauvais conducteurs thermiques. On peut améliorer leurs caractéristiques d'isolation en introduisant un gaz lors de la phase de solidification, ce qui leur confère une texture semblable à celle des mousses, comme les mousses phénoliques ($\lambda = 0,033 \text{ Wm}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$).

Le polyuréthane mousse se présente sous deux formes :

- Haute densité ($d = 0,6$) suffisamment rigide pour être utilisée dans la production de caissons de capteur, tout en offrant une excellente isolation ($\lambda = 0,08 \text{ Wm}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$).
- Faible densité ($d = 0,03$) qui est davantage fragile, mais supérieure pour l'isolation ($\lambda = 0,025 \text{ Wm}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$).

Il est préférable de mettre une couche d'isolant plus résistant à la chaleur sur ce genre de matériaux si la température excède 90°C .

Le polystyrène, de couleur blanche et généralement utilisé pour l'emballage, est un matériau très léger et fragile. Ses capacités d'isolation sont légèrement inférieures à celles du polyuréthane, sa conductivité thermique étant de l'ordre de $0,04 \text{ Wm}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$. Cependant, il est beaucoup plus abordable et commence à se sublimer dès 90°C . [24]

Tableau II.10: propriétés thermiques des quelques matériaux isolants [22]

Matériau	Conductivité thermique (W/m °K)	Masse volumique (Kg/m ³)	Chaleur massique (J/Kg. K)	Diffusivité (10 ⁻⁷ m ² /s)
Laine de verre	0.036	40	840	10.7
Polystyrène Expansé	0.040	20	1500	13.3
Laine de roche	0.040	40	840	11.9
Laine (vêtement)	0.040	450	1880	0.47
Liège expansé	0.048	120	1380	2.9
Bois de Spain	0.144	535	272	9.9
Caoutchouc pur	0.153	1200	2170	0.6

II.4.4.4. Isolant transparent (Aérogel de silice)

a) Préparation de l'aérogel de silice

L'aérogel de silice, obtenu par le processus sol-gel suivi d'une extraction supercritique du solvant, est l'isolant transparent le plus couramment utilisé et le plus avancé. En résumé, une solution colloïdale de silice est combinée à de l'eau, un alcool et un mélange de catalyseur. Deux processus seront observés : l'hydrolyse et la floculation, ce qui signifie que la stabilité de la solution colloïdale sera rompue. Le processus est effectué dans un autoclave qui permet, lors de l'élévation de la température (environ 28°C), d'atteindre une pression approximative de 120 bars. Le solvant est généralement évacué en 2 à 4 heures, et le matériau solide de faible densité qui en résulte est dénommé aérogel de silice. [26]

b) Propriété générale du matériau

Il s'agit d'un matériau de faible densité solide (avec une densité allant de 80 à 270 Kg/m³), transparent et poreux (sa porosité oscillante entre 35% et 98%).

- Pour une épaisseur approximative de 20mm, cet élément a un indice de réfraction qui oscille entre 1.02 et 1.05, avec une perte transmise d'environ 90% (variation de $\pm 2\%$). Sa conductivité thermique est approximativement de 0.02 w/m.k.
- Le matériau reste stable jusqu'à une température de 750 °C et une pression de 300 kPa. La nécessité de recouvrir le capteur avec du verre est dictée par sa fragilité et sa susceptibilité à l'eau. [26]

II.4.5. Coffre (boîtier)

Le coffre, généralement fait d'aluminium ou de bois, abrite l'absorbeur et l'isolation thermique du capteur, offrant ainsi une protection contre l'humidité et les dommages mécaniques. [27]

On observe deux configurations de boîtier [28] :

a) Boîtier simple

Il se compose d'une unique couche de matériau en forme de récipient où l'isolation et l'absorbeur sont installés.

b) Boîtier double

Sa structure en caisson lui donne une plus grande solidité et facilite une intégration optimale de l'isolation.

II.5. Classification des capteurs

On les classe selon :

II.5.1. Fluide de travail utilisé

a) Air

Le capteur solaire à air est un composant essentiel de tout système d'énergie solaire actif utilisant l'air. On utilise diverses configurations possibles pour le classement de ces capteurs, chaque configuration étant adaptée à une application spécifique [29].

On distingue plusieurs catégories de capteurs d'air, tels que [20] :

- Capteur solaire à absorbeur rainuré
- Capteur solaire à absorbeur plan
- Capteur solaire à nid d'abeille

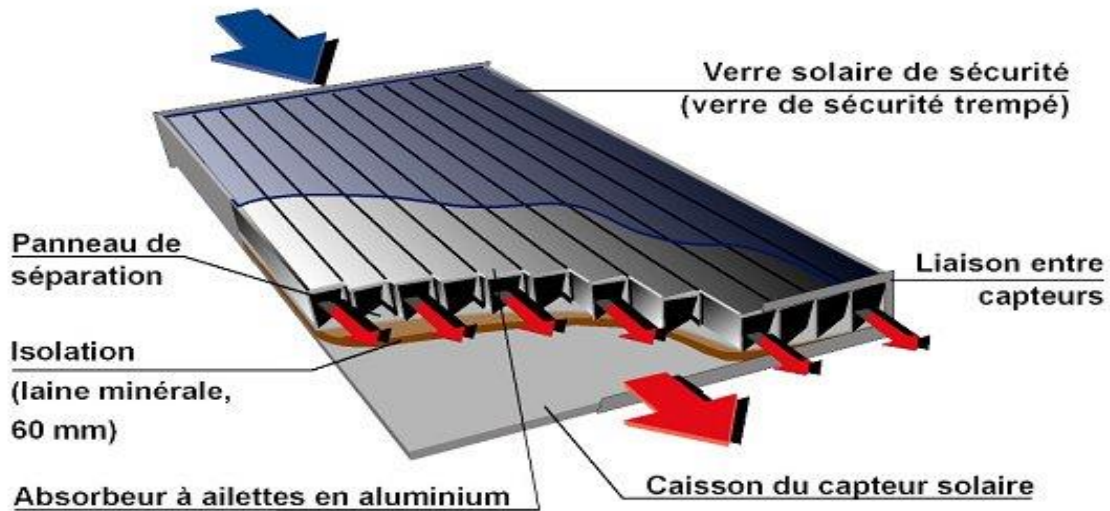


Figure II.20 : Capteur solaire à air [31]

b) Eau

Ils sont compatibles avec les dispositifs de chauffage à liquide, y compris ceux qui font bouillir le liquide lors du processus de chauffage (la production de l'eau sanitaire).

On peut classer les capteurs à eau en capteurs à :

- Faible pression de circulation, comme c'est le cas pour les chauffages des piscines.
- Circulation à haute pression où le réseau d'eau est principalement constitué de tuyaux en cuivre et de plaques métalliques qui amplifient la surface d'absorption.

Les capteurs solaires plans utilisent principalement l'eau et l'air comme fluides de travail, mais d'autres alternatives existent, comme les hydrocarbures pour la réfrigération et la production d'électricité.[32]

II.5.2. Orientation des capteurs

a) Capture solaire fixe

Ces capteurs, comme ceux utilisés dans les chauffe-eaux solaires domestiques, sont statiques tout au long de la journée et présentent les caractéristiques suivantes [33] :

- Une grande simplicité et fiabilité.
- Un besoin d'entretien minimal.
- Ils peuvent être intégrés directement dans une structure (comme un toit ou un mur).

b) Capture solaire a poursuite

Un mécanisme de suivi automatique peut être installé sur le capteur solaire, orientant automatiquement vers la source lumineuse, ce qui améliore l'efficacité du capteur.[34]

On distingue deux principales catégories de capteurs : les capteurs à poursuite unidimensionnelle, qui suivent le mouvement du soleil soit en horizontal (est-ouest) soit en vertical (en fonction de l'angle d'inclinaison), et les capteurs à poursuite bidimensionnelle, qui modifient aussi bien l'orientation que l'inclinaison pour optimiser l'exposition au rayonnement solaire.

II.5.3. Types des composants

Les composants des collecteurs diffèrent d'un capteur à un autre, on peut classer les capteurs suivants :

II.5.3.1. Couverture

On peut trouver alors :

a) Capteurs plans non vitré

C'est le modèle le plus basique, le plus abordable financièrement, mais il est aussi le moins performant. Il est généralement composé d'une plaque de métal ou de plastique (absorbeur) sur laquelle sont fixés plusieurs tubes transportant un fluide caloporteur. Les capteurs plans non vitrés ne sont pas isolés sur le devant, ce qui fait qu'ils sont plus adaptés à des applications à basse température (moins de 30°C). L'application principale de ces capteurs se trouve dans le chauffage des piscines en extérieur. Ces capteurs, n'ayant pas de vitrage, captent une grande quantité d'énergie solaire. Cependant, comme ils ne sont pas isolés sur leur face avant, une grande partie de la chaleur absorbée se perd, en particulier quand il y a du vent et que la température extérieure n'est pas suffisamment haute. Ces capteurs, exposés à de l'air chaud, recueillent la chaleur échangée notamment durant la nuit quand il fait plus chaud à cause du vent extérieur.[25]

Ce type de produit permet une intégration architecturale typique qui facilite la mise en place de surfaces plus étendues, compensant ainsi l'écart d'efficacité avec les capteurs vitrés plans, surtout durant la saison hivernale.[1]



Figure II.21: Vu d'un capteur solaire non vitré [36]

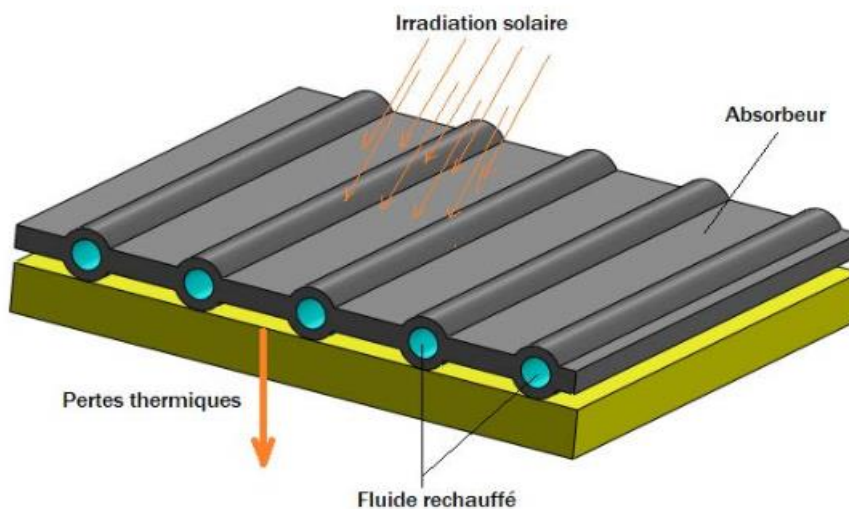


Figure II.22: Description d'un capteur solaire non vitré [36]

a) Capteurs solaires plans vitrés

Les capteurs de type vitré, qui sont couramment utilisés, se présentent sous deux formes : les capteurs à circulation de liquide et les capteurs à air. Ces capteurs sont plus appropriés pour des utilisations à température modérée, où la température souhaitée se situe entre 30 et 70 °C, et/ou pour des applications requérant de la chaleur durant l'hiver. Les capteurs à circulation de fluide sont généralement employés pour le réchauffement de l'eau domestique et commerciale, le chauffage des édifices ainsi que celui des piscines intérieures. Les détecteurs d'air sont employés pour le réchauffement des édifices, l'air de ventilation et le séchage des récoltes.

Dans ce genre de capteur, un absorbeur plat convertit efficacement les rayons solaires en chaleur. Pour minimiser la déperdition de chaleur, la plaque est placée entre un vitrage (qu'il soit en verre plat ou en matière transparente) et une paroi isolante. Le choix du vitrage est fait pour que le plus grand nombre possible de rayons solaires puisse le traverser et atteindre l'absorbeur.[37]



Figure II.23: Capteur plan vitré intégré à la toiture [38]

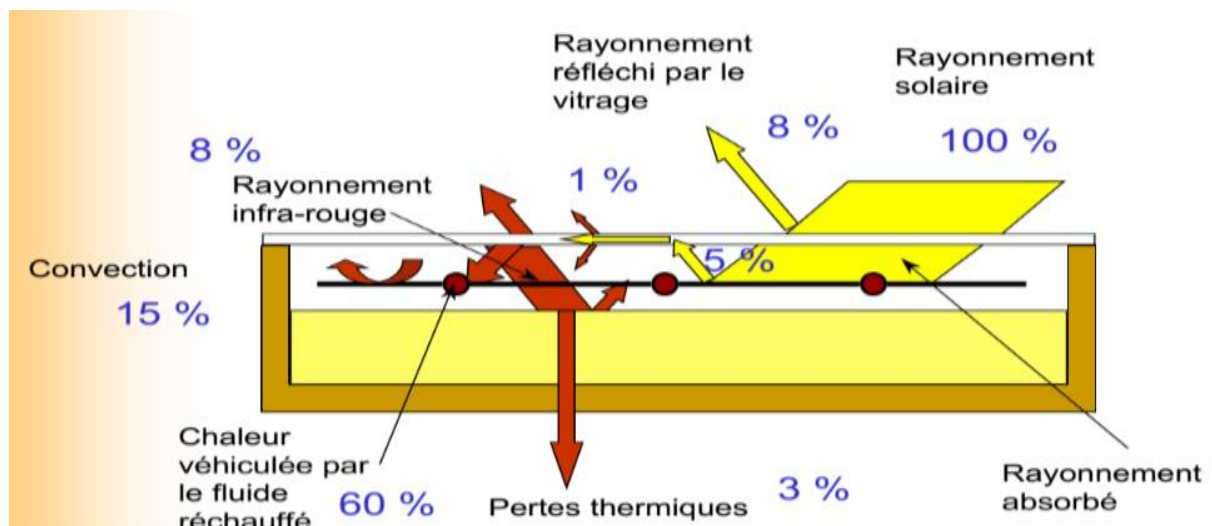


Figure II.24: Principe de fonctionnement des capteurs plans vitrés [39]

II.6. Bilan thermique global de la paroi absorbante

L'équation du bilan thermique de la paroi absorbante est la suivante : [20]

$$\Phi_{sa} = \Phi_{p \rightarrow} + \Phi_u + \Phi_{st} \quad (W) \quad (II.1)$$

Où :

Φ_{sa} : Flux solaire absorbé.

$\Phi_{p \rightarrow}$: Flux perdu à travers la paroi absorbante.

Φ_u : Flux utile transmis au fluide caloporteur

Φ_{st} : Flux stocké dans le capteur qui s'écrit :

$$\Phi_{st} = M_e c_{eau} \frac{\partial T}{\partial t} \quad (W) \quad (II.2.)$$

Où :

M_e : Masse en eau du capteur définie par : $\sum m_i c_i = M_e c_{eau}$, i représentant les différents éléments constitutifs du capteur.

T : Température moyenne du capteur.

t : Temps.

On note la puissance absorbée par le capteur comme suit :

$$\Phi_{sa} \approx \tau_{cs} \alpha_{ps} G_{(i,y)}^* S \quad (W) \quad (II.3)$$

Φ_{sa} : Flux solaire absorbé par la surface exposée (W).

τ_{cs} : Coefficient de transmission de la couverture transparente par rapport au rayonnement solaire.

α_{ps} : Coefficient d'absorption de la paroi absorbante par rapport au rayonnement solaire.

$G_{(i,y)}^*$: Eclairement (densité de flux) solaire incident sur le capteur ($W.m^{-2}$).

S : Surface de la paroi absorbante.

Si le fluide caloporteur ne connaît aucune transformation d'état, la formule du flux utile est :

$$\Phi_u = Q_{cf} (T_{fs} - T_{fe}) \quad (W) \quad (II.4)$$

Où :

Q_{cf} : Débit calorifique du fluide caloporteur ($W. ^\circ C^{-1}$) = débit massique \times capacité calorifique

T_{fs} : Température du fluide caloporteur à la sortie de l'absorbeur

T_{fe} : Température du fluide caloporteur à l'entrée de l'absorbeur.

La forme des pertes de chaleur du capteur est présentée comme suit :

$$\phi_{p \rightarrow} = h_p (T_{pm} - T_a) S \quad (W) \quad (II.5)$$

Où :

h_p : Coefficient global de pertes du capteur

T_{pm} : Température moyenne de la paroi absorbante

T_a : Température de l'air extérieur

Pour un capteur plan, on peut dans une première approche déterminer la température moyenne

T_{pm} par :

$$T_{pm} = \frac{3 T_{fs} + T_{fe}}{4} + \Delta T \quad (^\circ C) \quad (II.6)$$

Pour prendre en considération la non-linéarité du changement de température du fluide dans le capteur, ainsi que la différence de température ΔT entre le fluide et la paroi absorbante.

II.6.1. Rendements d'un capteur solaire

Les rendements d'un capteur sont déterminés en fonction du flux solaire incident de la façon suivante : [20]

- Le rendement global :

$$\eta = \frac{\phi_u}{G_{(i,y)}^* S} \quad (II.7)$$

- Le rendement interne :

$$\eta_i = \frac{\phi_u}{\phi_{sa}} \quad (II.8)$$

- Le rendement optique :

$$\eta_o = \frac{\Phi_{sa}}{G_{(i,y)}^* S} \quad (\text{II. 9})$$

On définit également des rendements moyens sur une période donnée (jour, mois, année). Pour ce faire, on intègre la relation du bilan (3.1) sur la période choisie :

$$\int_0^t \Phi_{sa} dt = \int_0^t \Phi_u dt = \int_0^t \Phi_{p \rightarrow} dt \quad \text{Soit} \quad \Phi_{sa} = \Phi_{p \rightarrow} + \Phi_u$$

On établit par conséquent les rendements global η , interne η_i et optique η_o moyens du capteur sur la période considérée par :

$$\bar{\eta} = \frac{\Phi_u}{\int_0^t G_{(i,y)}^* S dt} \quad (\text{II. 10}) \quad \bar{\eta}_i = \frac{\Phi_u}{\Phi_{sa}} \quad (\text{II. 11}) \quad \bar{\eta}_o = \frac{\Phi_{sa}}{\int_0^t G_{(i,y)}^* S dt} \quad (\text{II. 12})$$

Lors du calcul de dimensionnement d'un capteur solaire, ces rendements doivent être pris en compte. On ne doit pas les confondre avec les rendements instantanés qui sont toujours supérieurs (un rendement moyen quotidien prend en compte le refroidissement nocturne, par exemple).

II.6.2. Expression du coefficient global de pertes

II.6.2.1. Capteur solaire couvert de type 1

La figure 3.2 illustre le schéma des échanges thermiques convectifs entre la paroi absorbante et l'environnement extérieur dans un capteur solaire que nous désignerons sous le nom de type 1. [20]

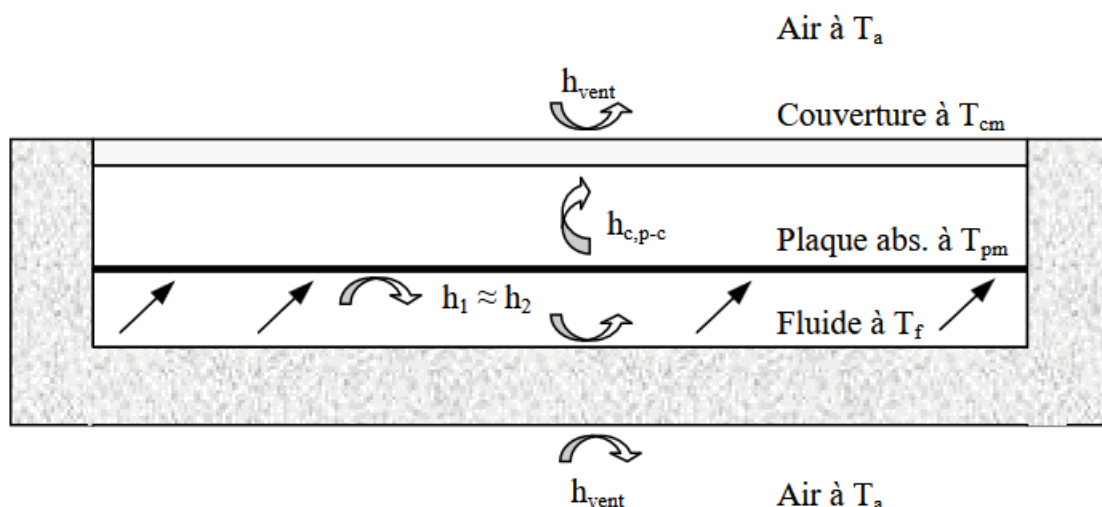


Figure II.25: Schématisation des flux convectifs dans un capteur couvert de type 1. [20]

a) Pertes thermiques vers le haut

Pertes thermiques vers le haut ils peuvent écrire : [20]

$$\phi^{\uparrow} = \phi_{c,p-c} + \phi_{r,p-c} = \phi_{c,c-a} + \phi_{r,c-c} \quad (\text{II.13})$$

Où :

$\phi_{c,p-c}$: Flux échangé par convection-conduction entre la paroi absorbante et la couverture.

$\phi_{r,p-c}$: Flux échangé par rayonnement entre la paroi absorbante et la couverture.

$\phi_{c,c-a}$: Flux échangé par convection entre la couverture et l'air extérieur.

$\phi_{r,c-c}$: Flux échangé par rayonnement entre la couverture et le milieu extérieur.

On peut exprimer chacun de ces flux comme suit :

$$\phi_{c,p-c} = h_{c,p-c} (T_{pm} - T_{cm}) S \quad (\text{II.14})$$

Où :

$h_{c,p-c}$: est le coefficient de transfert de chaleur entre deux surfaces parallèles délimitant un espace clos contenant de l'air.

On peut calculer $\phi_{r,p-c}$ en considérant la paroi absorbante et la couverture comme deux surfaces parallèles infinies (la distance les séparant est négligeable comparé à leur largeur et longueur) grises et opaques (hypothèse selon laquelle la couverture ne laisse pas passer les rayons IR). Ces hypothèses nous permettent de rédiger : [20]

$$\phi_{r,p-c} = \sigma \frac{T_{pm}^4 - T_{cm}^4}{\frac{1}{\alpha_{pi}} + \frac{1}{\alpha_{ci}} - 1} S \quad \text{que l'on peut aussi écrire : } \phi_{r,p-c} = h_{r,p-c} (T_{pm} - T_{cm}) S \quad (\text{II.15})$$

$$\text{Avec : } h_{r,p-c} = \sigma \frac{(T_{pm}^2 + T_{cm}^2)(T_{pm} + T_{cm})}{\frac{1}{\alpha_{pi}} + \frac{1}{\alpha_{ci}} - 1} \quad (\text{II.16})$$

Avec :

α_{pi} : Coefficient d'absorption de la plaque par rapport au rayonnement IR.

α_{ci} : Coefficient d'absorption de la couverture par rapport au rayonnement IR.

Le calcul de $\phi_{c,c-a}$, qui est essentiellement tributaire de la vitesse du vent peut se calculer par:

$$\phi_{c,c-a} = h_{c,c-a} (T_{cm} - T_a) S \quad (\text{II. 17})$$

Le coefficient de convection peut être déterminé à l'aide de la corrélation suivante, où u_{vent} représente la vitesse moyenne du vent : [20]

$$h_{c,c-a} = h_{vent} = 5.7 + 3.8 u_{vent} \quad (\text{W. m}^{-2} \cdot \text{°C}^{-1}) \quad (\text{II. 18})$$

$$\phi_{r,c-c} = \sigma \alpha_{ci} (T_{cm}^4 - \varepsilon_a T_a^4) S = \sigma \alpha_{ci} (T_{cm}^4 - T_{ciel}^4) S \quad (\text{II. 19})$$

Où :

ε_a : Emissivité de l'atmosphère

T_{cm} : Température moyenne de la couverture.

T_{ciel} : Température équivalente du ciel.

On peut le formuler de la manière suivante :

$$\phi_{r,c-c} = h_{r,c-c} (T_{cm} - T_a) S \quad (\text{II. 20})$$

$$\text{Avec :} \quad h_{r,c-c} = \sigma \alpha_{ci} \frac{(T_{cm}^4 - \varepsilon_a T_a^4)}{T_{cm} - T_a} \quad (\text{II. 21})$$

L'expression du flux perdu vers le haut par la plaque absorbante peut alors être formulée comme suit :

$$\phi_p^\uparrow = (h_{c,p-c} + h_{r,p-c})(T_{pm} - T_{cm}) S = (h_{vent} + h_{r,c-c}) (T_{cm} - T_a) S \quad (\text{II. 22})$$

Soit encore :

$$\phi_p^\uparrow = \frac{T_{pm} - T_{cm}}{\frac{1}{h_{r,p-c} + h_{c,p-c}}} S = \frac{T_{cm} - T_a}{\frac{1}{h_{r,c-c} + h_{c,c-a}}} S = \frac{T_{pm} - T_a}{\frac{1}{h_{r,p-c} + h_{c,p-c}} + \frac{1}{h_{vent} + h_{r,c-c}}} S \quad (\text{II. 23})$$

b) Pertes thermiques vers le bas

Pertes thermiques vers le bas ils peuvent écrire :

$$\phi_p^\downarrow = \phi_{c,p-b} + \phi_{r,p-b} = \frac{T_b - T_a}{\frac{e_i}{\lambda_i S} + \frac{1}{h_{vent}}} \quad (\text{II. 24})$$

Où :

$\Phi_{c,p-b}$: Flux échangé par convection-conduction entre la paroi et le bas.

$\Phi_{r,p-b}$: Flux échangé par rayonnement entre la paroi et le bas.

λ_i : Conductivité thermique de l'isolant.

e_i : Epaisseur de l'isolant.

On peut exprimer les deux flux échangés entre le bas du capteur et la paroi absorbante de la manière suivante : [20]

$$\Phi_{c,p-b} = \frac{T_p - T_b}{\frac{1}{h_1} + \frac{1}{h_2}} \approx \frac{T_p - T_b}{\frac{2}{h_i}} \quad (\text{II. 25})$$

Car $h_1 \approx h_2 = h_i =$ coefficient de convection fluide/paroi.

$$\Phi_{r,p-b} = h_{r,p-b} (T_{pm} - T_b) S \quad (\text{II. 26})$$

Avec :

$$h_{r,p-b} = \sigma \frac{(T_{pm}^2 + T_b^2)(T_{pm} + T_b)}{\frac{1}{\alpha_{pi}} + \frac{1}{\alpha_{bi}} - 1} \quad (\text{II. 27})$$

α_{bi} : Coefficient d'absorption du fond du capteur par rapport au rayonnement IR.

On peut donc conclure :

$$\Phi_p^\downarrow = \frac{T_{pm} - T_b}{\frac{1}{h_{c,p-b} + h_{r,p-b}}} S = \frac{T_b - T_a}{\frac{e_i}{\lambda_i S} + \frac{1}{h_{vent}}} S = \frac{T_{pm} - T_a}{\frac{1}{h_{c,p-b} + h_{r,p-b}} + \frac{e_i}{\lambda_i S} + \frac{1}{h_{vent}}} S \quad (\text{II. 28})$$

c) Pertes thermiques totales

On obtient finalement :

$$\Phi_p = \Phi_p^\uparrow + \Phi_p^\downarrow = \frac{T_{pm} - T_a}{\frac{1}{h_{r,p-c} + h_{c,p-c}} + \frac{1}{h_{vent} + h_{r,c-c}}} + \frac{T_{pm} - T_a}{\frac{1}{h_{c,p-b} + h_{r,p-b}} + \frac{e_i}{\lambda_i S} + \frac{1}{h_{vent}}} \quad (\text{II. 29})$$

Que l'on peut mettre sous la forme :

$$\Phi_p = h_p (T_{pm} - T_a) S \quad (\text{II. 30})$$

Avec :

$$h_p = \frac{1}{\frac{1}{h_{r,p-c} + h_{c,p-c}} + \frac{1}{h_{vent} + h_{r,c-c}}} + \frac{1}{\frac{1}{h_{c,p-b} + h_{r,p-b}} + \frac{e_i}{\lambda_i S} + \frac{1}{h_{vent}}} \quad (II.31)$$

II.6.2.2. Capteur solaire couvert de type 2

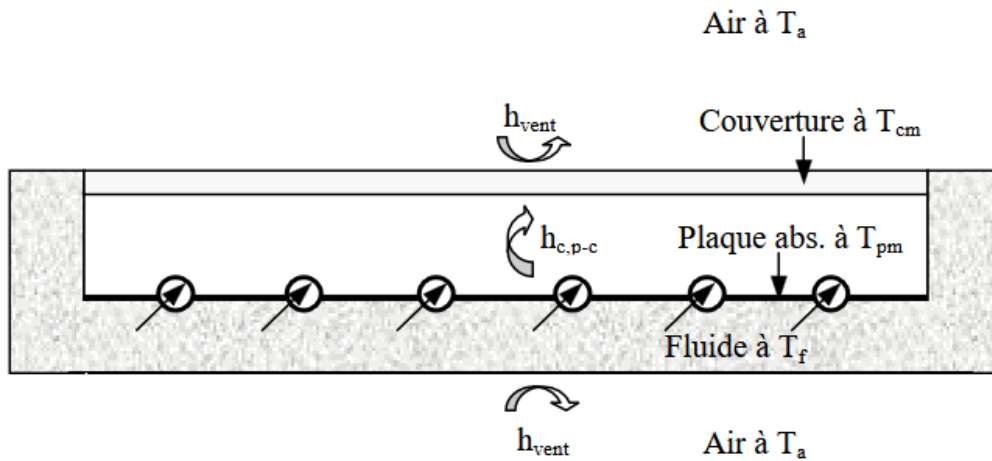


Figure II.26: Schématisation des flux convectifs dans un capteur solaire couvert de type 2.

Une analyse similaire conduit au résultat suivant :

$$h_p = \frac{1}{\frac{1}{h_{r,p-c} + h_{c,p-c}} + \frac{1}{h_{vent} + h_{r,c-c}}} + \frac{1}{\frac{e_i}{\lambda_i S} + \frac{1}{h_{vent}}} \quad (W. m^{-2}. ^\circ C^{-1}) \quad (II.31)$$

II.6.2.3. Capteur solaire non-couvert de type 3

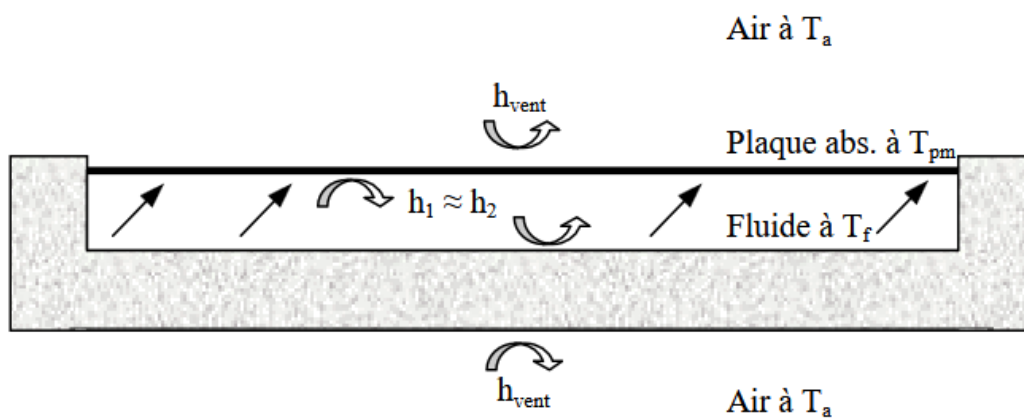


Figure II.27: Schématisation des flux convectifs dans un capteur solaire non-couvert de type 3.

On définit l'équation :

$$h_p = h_{\text{vent}} + h_{r,c-c} + \frac{1}{\frac{1}{h_{c,p-b} + h_{r,p-b}} + \frac{1}{\frac{e_i}{\lambda_i S} + \frac{1}{h_{\text{vent}}}}} \quad (\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}) \quad (\text{II.32})$$

II.6.2.4. Capteur solaire non-couvert de type 4

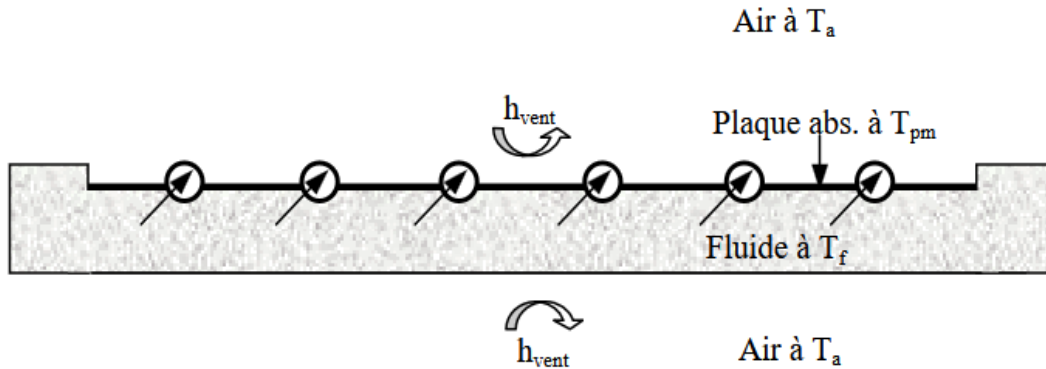


Figure II.28: Schématisation des flux convectifs dans un capteur solaire non-couvert de type 4.

II.7. Bilan thermique de la couverture transparente

Selon ce qui précède, le bilan thermique de la couverture transparente peut être formulé de la manière suivante : [20]

$$(h_{c,p-c} + h_{r,p-c})(T_{pm} - T_{cm}) S = (h_{\text{vent}} + h_{r,c-c}) (T_{cm} - T_a) S \quad (\text{II.33})$$

Avec :

$$h_{r,c-c} = \sigma \alpha_{ci} \frac{(T_{cm}^4 - \varepsilon_a T_a^4)}{T_{cm} - T_a} \quad ; \quad h_{\text{vent}} = 5.7 + 3.8 u_{\text{vent}} \quad ; \quad h_{r,p-c} = \sigma \frac{(T_{pm}^2 + T_{cm}^2)(T_{pm} + T_{cm})}{\frac{1}{\alpha_{pi}} + \frac{1}{\alpha_{ci}} - 1}$$

$h_{c,p-c}$: Coefficient global de convection dans la cellule fermée délimitée par la paroi absorbante et la couverture transparente. La connaissance de T_{pm} facilite le calcul de T_{cm} en résolvant l'équation (II.33) à l'aide d'une méthode itérative.

II.8. Conclusion

Ce chapitre a offert une vue générale des capteurs solaires plans, détaillant leur fonctionnement basé sur la conversion de l'énergie solaire en chaleur, grâce à l'effet de serre. Les divers composants ont été analysés : l'absorbeur, le fluide caloporteur, la couverture transparente, l'isolation thermique, et le coffret.

Nous avons également discuté de la classification des capteurs en fonction du fluide employé, de leur orientation, et de la nature des composants. En conclusion, une analyse thermique a permis d'évaluer les rendements, les pertes d'énergie, et l'importance cruciale du choix des matériaux.

En résumé, la performance d'un capteur solaire plan est grandement influencée par sa conception, les matériaux employés, et les conditions d'exploitation, faisant de lui un élément essentiel dans le développement de systèmes solaires thermiques durables.

Chapitre III : Résultats et discussion

III.1. Présentation du logiciel ANSYS

Le Workbench offre la possibilité de gérer les fichiers et de lancer divers logiciels à partir d'une seule fenêtre. C'est dans cette fenêtre principale que vous pouvez créer des fichiers, démarrer des logiciels, et orchestrer les interactions entre les différents logiciels utilisés pour la géométrie, le maillage, la simulation elle-même, et le post-traitement. [40]

Pour effectuer notre simulation numérique avec ANSYS FLUENT, nous avons suivi ces étapes :

- Création de la géométrie avec le logiciel Design Modeler.
- Élaboration du maillage à l'aide d'ANSYS Meshing.
- Définition du problème à résoudre dans ANSYS FLUENT.
- Exécution des calculs pour les différents scénarios retenus avec ANSYS FLUENT.
- Analyse des résultats obtenus.

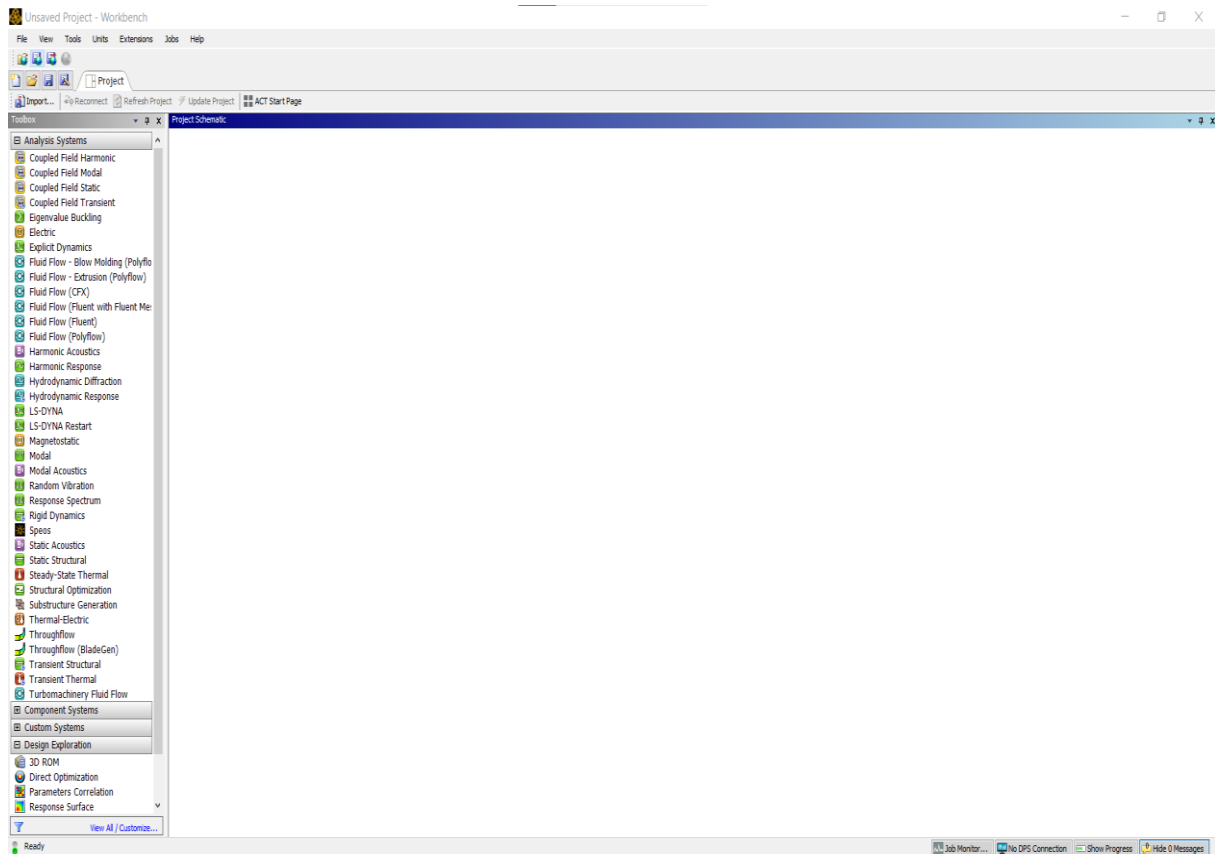


Figure III.29: l'interface de logiciel ANSYS Workbench.

III.2. Principes des codes CFD

Les codes de CFD (Computational Fluid Dynamics) offrent la possibilité de résoudre numériquement les équations qui décrivent le comportement des fluides, comme celles de conservation de la masse, de la quantité de mouvement (les fameuses équations de Navier-Stokes), et de l'enthalpie. De nombreux outils CFD sont disponibles, mais pour notre étude, nous avons opté pour le logiciel Fluent (Workbench version 22.R1) car il s'adapte parfaitement à nos besoins en matière de calcul. [41]

Voici un aperçu général des étapes impliquées dans la construction d'un modèle CFD : [41]

- **Acquisition ou création de la géométrie :**

Il est important de se procurer ou de concevoir la représentation géométrique du système analysé. Cette étape peut être accomplie à l'aide de logiciels de modélisation 3D.

- **Élaboration d'un maillage adapté :**

Après avoir établi la géométrie, il est essentiel de la diviser en un maillage composé de petits éléments ou cellules. Ce maillage doit correspondre à la géométrie et au niveau de précision recherché. Un maillage plus fin offre une meilleure résolution, mais il demande aussi davantage de ressources de calcul.

- **Définition des conditions aux limites :**

Les conditions aux limites définissent comment le fluide se comporte à la frontière entre la zone de calcul et son environnement. Elles peuvent inclure des paramètres tels que la vitesse, la pression, et la température.

Sélection d'un modèle de turbulence :

En fonction de la nature de l'écoulement, il est crucial de choisir un modèle de turbulence adapté pour simuler correctement les effets turbulents. Les modèles les plus souvent employés incluent le modèle k-epsilon, le modèle k-omega, le modèle RANS (Reynolds-Averaged Navier-Stokes), etc.

- **Configuration et lancement de la simulation :**

Avant de démarrer la simulation, il est essentiel de déterminer les paramètres nécessaires, comme la discrétisation temporelle ou les critères d'arrêt, etc. Après avoir fixé ces paramètres, on peut alors procéder à l'exécution de la simulation.

- **Analyse des résultats :**

Après la fin de la simulation, il est essentiel d'examiner les résultats pour tirer des conclusions sur le comportement du fluide. Cela peut impliquer la visualisation des champs de vitesse, de pression, de température, entre autres, ainsi que le calcul de grandeurs physiques telles que les forces et les coefficients de traînée. Il est crucial de garder à l'esprit que cette approche générale peut différer en fonction du logiciel CFD utilisé et des particularités de chaque étude. Dans notre cas, nous avons opté pour le code CFD Fluent (versions Workbench 22) pour satisfaire précisément nos exigences de calcul.

III.2.1. Partie de géométrie

La géométrie a été élaborée à l'aide du logiciel ANSYS Design Modeler, qui offre la possibilité de réaliser des dessins 2D (sketch) et de générer des objets 3D à partir de ces esquisses grâce à des opérations telles que l'extrusion. Il permet également de manipuler les objets 3D créés. Dans notre situation, nous avons œuvré en trois dimensions dans le plan XYZ pour concevoir la géométrie du problème.

III.2.1.1. Présentation du problème

Pour améliorer les performances du capteur solaire nous avons ajoutés des chicane au niveau de l'absorbeur.

Nous avons étudié 2 cas :

1. Absorbeur avec chicane rectangulaires
2. Absorbeur avec des chicane trapézoïdales

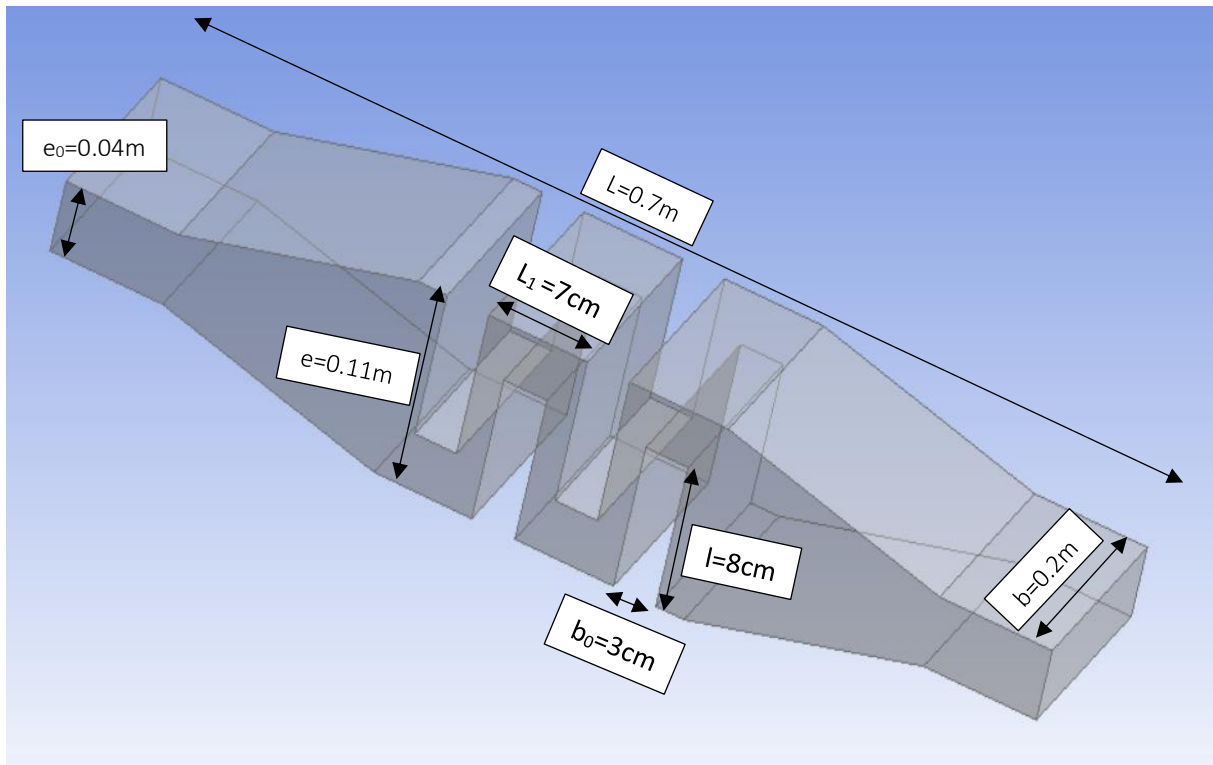


Figure III.30: Absorbeur avec chicanes rectangulaires

L : la longueur de l'absorbeur

b : la largeur de l'absorbeur

e_0 : l'épaisseur à l'entrée et la sortie de l'absorbeur

e : l'épaisseur au milieu de l'absorbeur

l : la longueur de chicane

b_0 : la largeur de chicane

L_1 : L'espace entre les deux chicanes

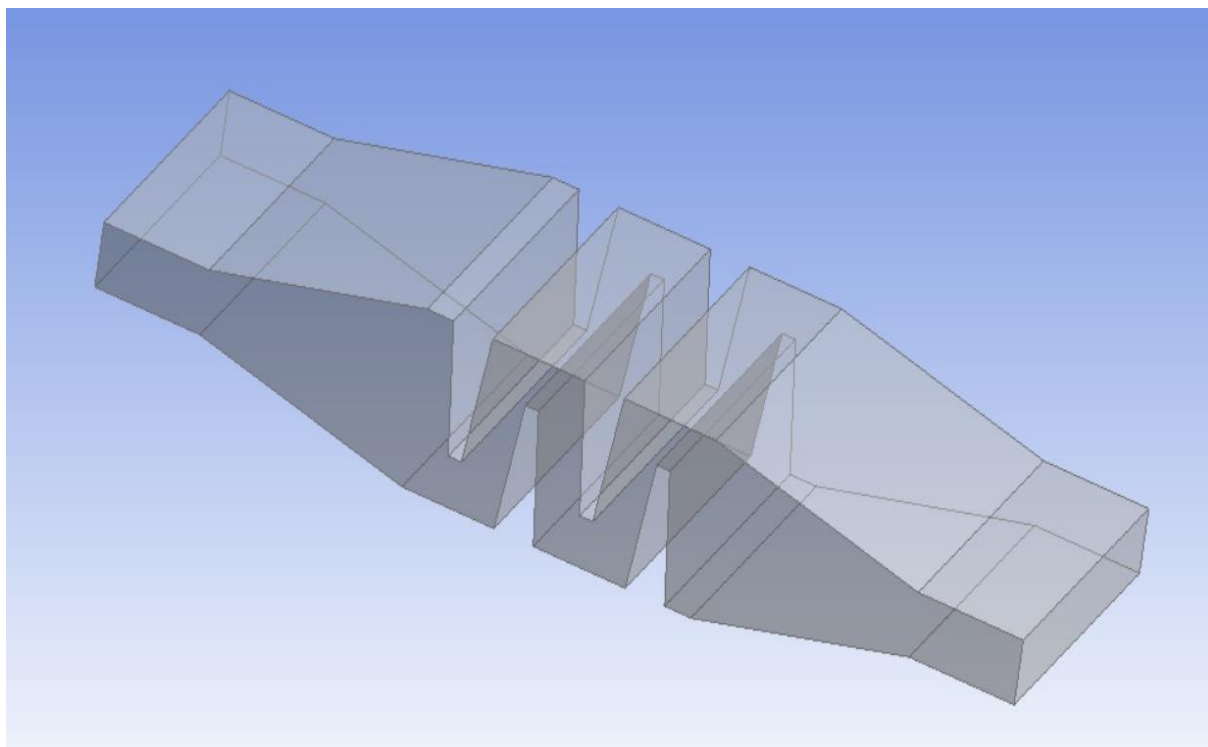
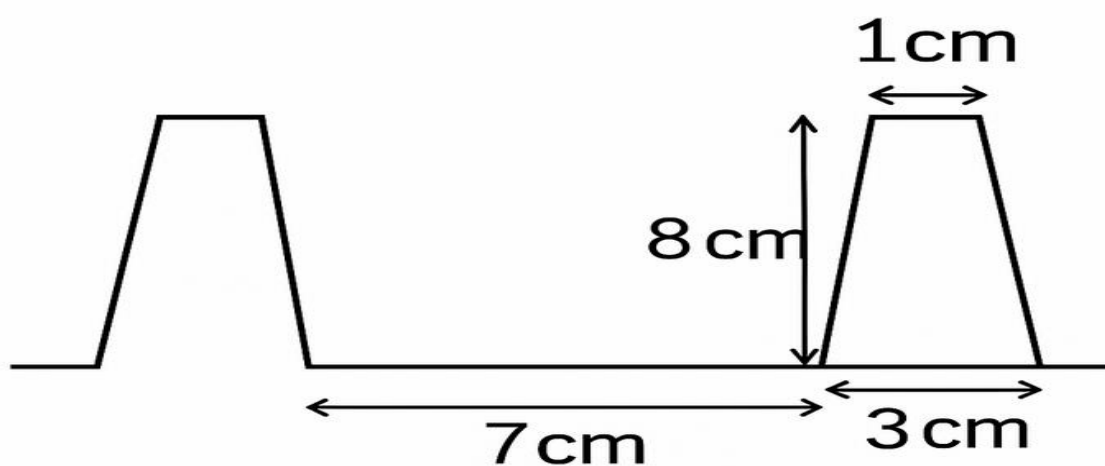


Figure III.31: Absorbeur avec chicanes trapézoïdales.



III.2.2. Partie de maillage

Pour générer le maillage, nous avons ouvert ANSYS Meshing en double-cliquant sur l'option Maillage dans l'interface de Workbench. Sélectionner un maillage adapté constitue une phase cruciale dans la simulation numérique. Il est donc primordial de choisir un maillage qui correspond parfaitement aux spécificités des problèmes à traiter. [41]

Le tableau III.1 présente les résultats du maillage généré :

Tableau III.11: Les détails du maillage généré.

Modèle	Nœuds	Eléments	Taille de l'élément
Absorbeur avec chicanes rectangulaires	373116	344179	0.03
Absorbeur avec chicanes triangulaires	398956	370644	0.03

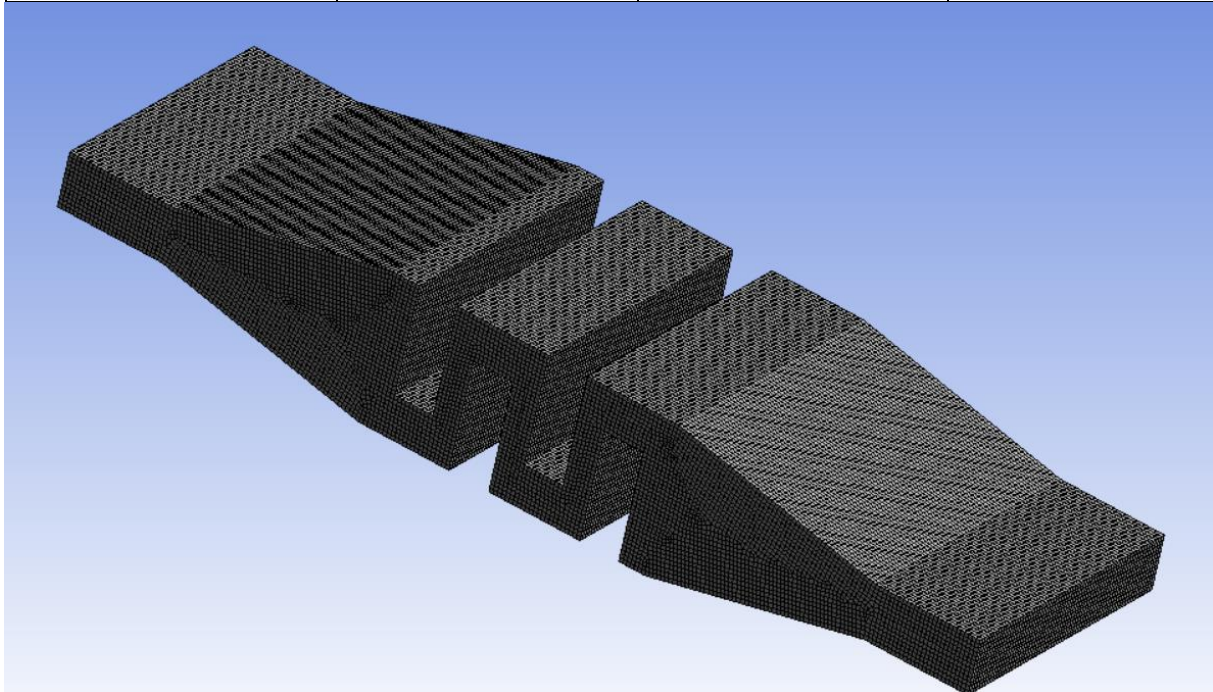


Figure III.32: Le maillage généré final de géométrie étudié.

III.2.3. ANSYS FLUENT

FLUENT est un logiciel de simulation destiné à modéliser les mouvements des fluides et les échanges thermiques à l'intérieur ou autour de formes géométriques complexes. Très utilisé dans divers secteurs tels que l'aérospatiale, l'automobile, le nucléaire, la chimie, la biomédecine, l'environnement, et la météorologie, ce logiciel permet de traiter des problèmes d'écoulement avec des maillages non structurés, même dans des géométries compliquées, tout en restant relativement facile à utiliser.

Le logiciel FLUENT utilise une méthode de modélisation numérique renommée pour sa puissance de calcul et sa simplicité d'utilisation : la méthode des volumes finis. Cette méthode repose sur une technique de discrétisation qui transforme les équations de conservation aux dérivées partielles en équations algébriques, lesquelles sont ensuite résolues numériquement.

III.2.3.1. Conditions aux limites

- La vitesse de l'air à l'entrée : $V_0 = 0,2 \text{ m/s}$
- La température de l'air à l'entrée $T_e = 300^\circ\text{K}$
- La température de la paroi supérieure de l'absorbeur et des chicane supérieure : $T = 400 \text{ }^\circ\text{K}$
- La température de la paroi inférieure de l'absorbeur et des chicane inférieure : $T = 360 \text{ }^\circ\text{K}$
- La pression à la sortie : $P_s = P_{\text{atm}}$

III.3. Discussion

III.3.1. Effet de chicane

III.3.1.1. Champs de vitesse

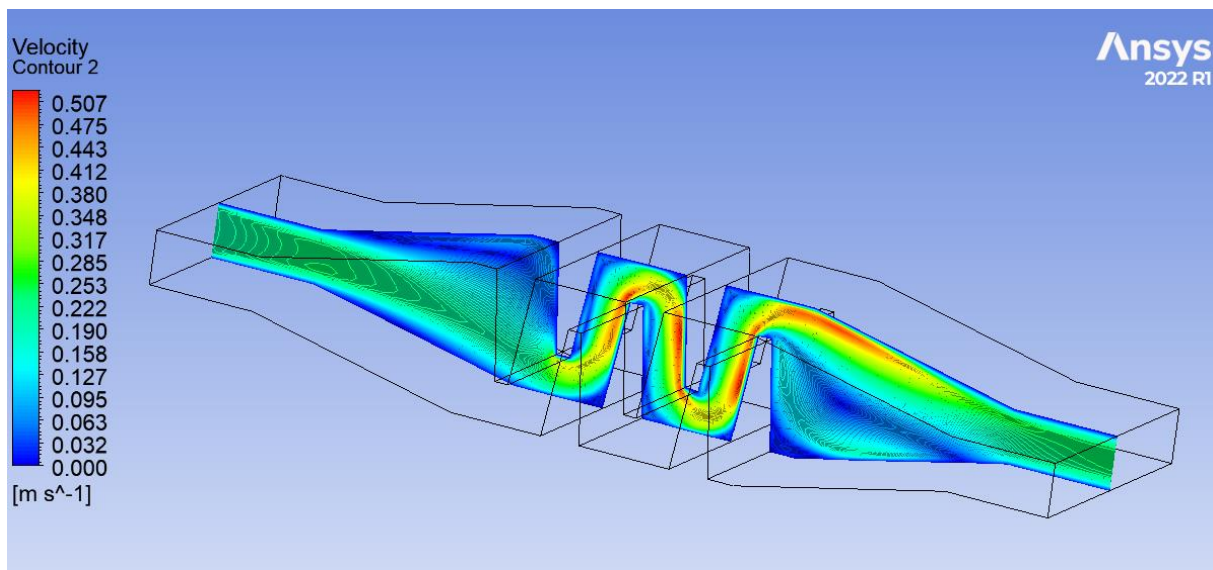


Figure III.33: Contour de vitesse d'un absorbeur avec chicane trapézoïdales

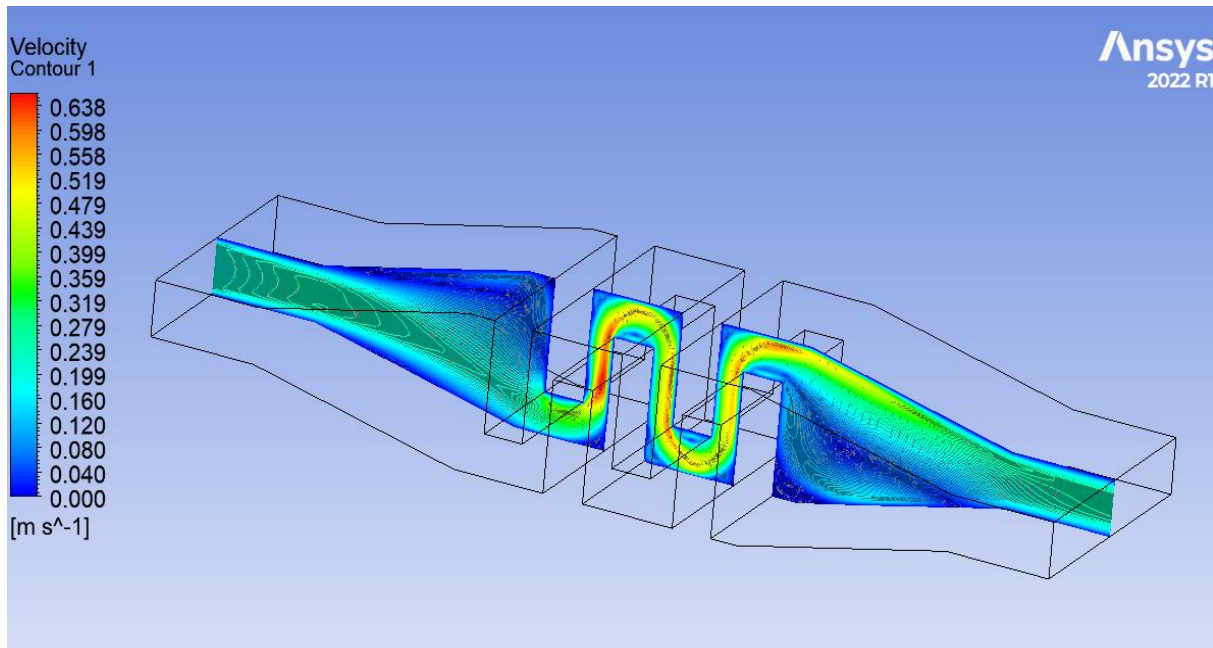


Figure III.34: Contour de vitesse d'un absorbeur avec chicane rectangulaire

Interprétation

Le contour de vitesse illustre comment les formes des chicane, qu'elles soient rectangulaires ou trapézoïdales, influencent le flux d'air à travers l'absorbeur. Avant d'atteindre les chicane, on observe dans les coins supérieurs des zones où la vitesse est pratiquement nulle, créant des espaces stagnants où l'air circule très peu et favorise le passage central. L'écoulement est ensuite redirigé vers les passages étroits entre les chicane, ce qui provoque une accélération locale. À l'endroit des chicane, la réduction significative de la section de passage contraint le fluide à accélérer brusquement, atteignant sa vitesse maximale juste après cette zone resserrée. Après les chicane, en aval, l'air maintient une vitesse élevée dans les passages bien encadrés, tandis que dans les zones où l'espace s'élargit, le fluide ralentit et sa vitesse diminue.

Ce phénomène d'expansion se retrouve dans les deux types de géométries. La différence principale réside dans la nature des transitions : les chicane rectangulaires, avec leurs coins aigus, provoquent des transitions plus soudaines et des zones de stagnation plus prononcées derrière les obstacles. En revanche, les chicane trapézoïdales, avec leurs faces inclinées, entraînent des transitions plus progressives et des zones de stagnation moins importantes. Malgré ces variations, le comportement général du champ de vitesse est très semblable dans les deux situations.

III.3.1.2. Champs de température

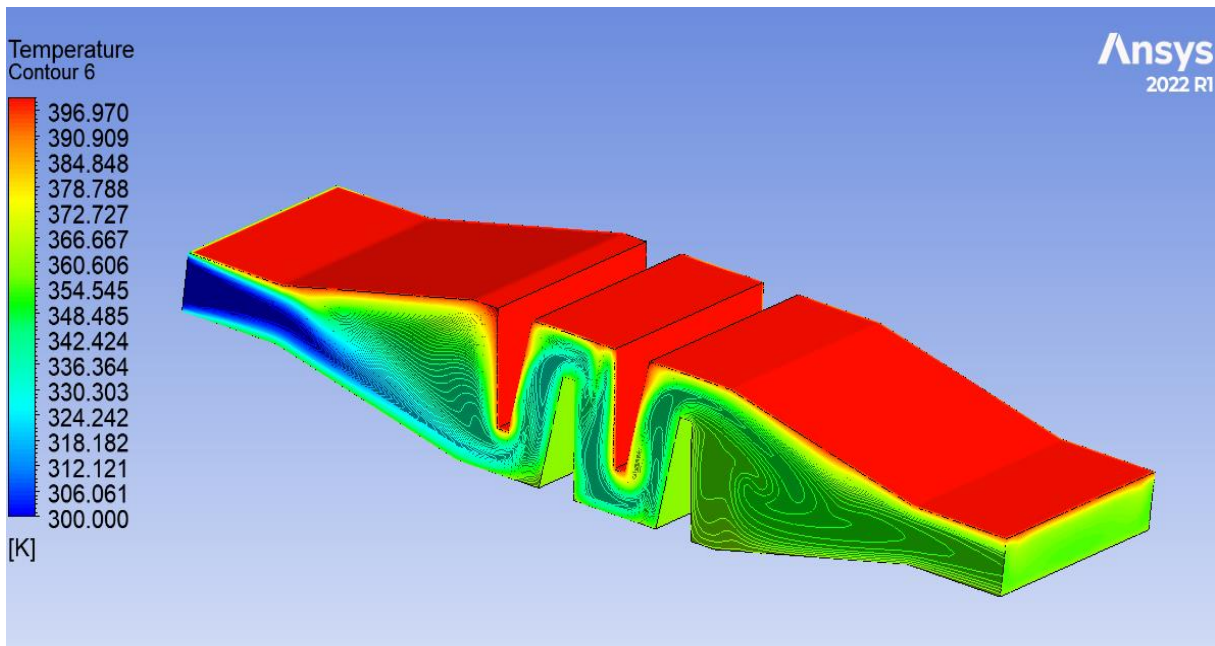


Figure III.35: Contour de température d'un absorbeur avec chicane trapézoïdale

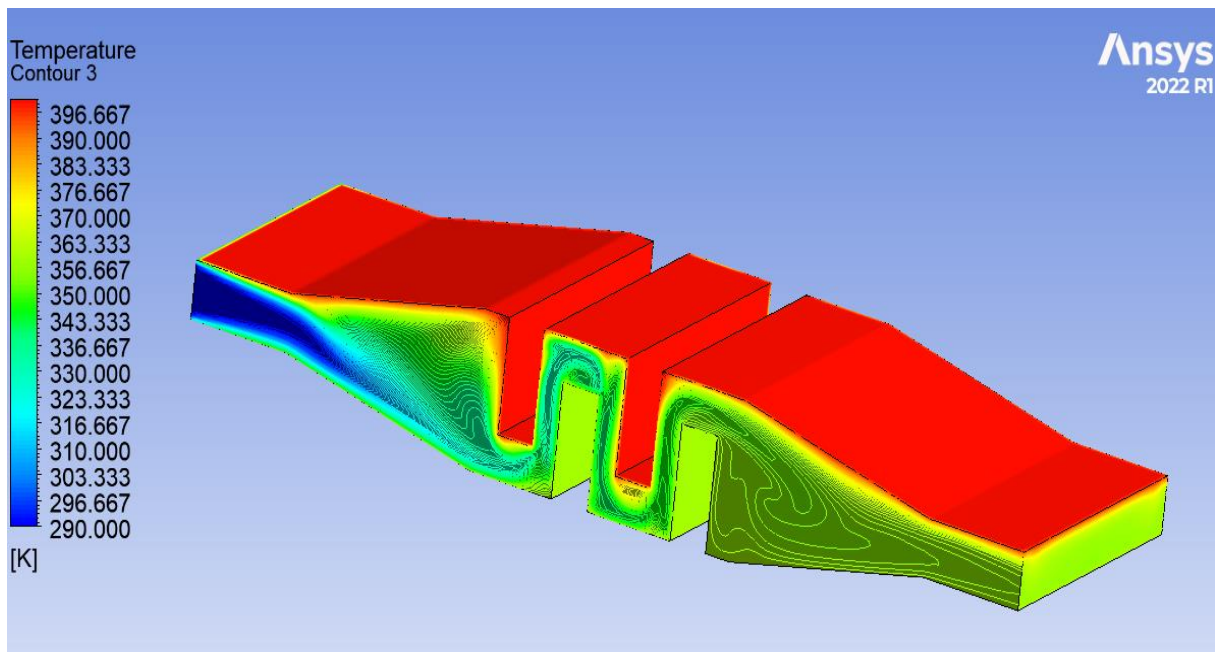


Figure III.36: Contour de température d'un absorbeur avec chicane rectangulaire

Interprétation

Les contours de température illustrent la montée progressive de la chaleur de l'air à l'intérieur de l'absorbeur pour les deux configurations, à savoir les chicanes trapézoïdales et rectangulaires. À l'entrée, tant que la section de passage reste inchangée, la température de l'air est uniforme. Toutefois, dès que l'on atteint la zone divergente, une variation de réchauffement

se manifeste. La partie supérieure de l'absorbeur, située à proximité de la paroi chauffée, affiche une température plus élevée que la partie inférieure. Ce phénomène s'explique par la présence de zones de stagnation ou de "zones mortes" dans les coins supérieurs, où le mouvement de l'air est très lent. Ce séjour prolongé permet à l'air de s'échauffer davantage dans ces zones. En revanche, dans la partie inférieure, l'air circule plus rapidement le long de la trajectoire principale d'écoulement, établissant un contact bref avec la paroi inférieure, qui est moins chaude, ce qui entraîne des températures plus basses dans cette région.

Dans la zone des chicanes, la température augmente davantage à cause de l'étroitesse des passages créés entre les chicanes et les parois, qui canalisent le fluide dans un espace réduit, rapproche l'air des surfaces chauffées et améliore l'efficacité des échanges thermiques à cet endroit. La configuration des chicanes joue ensuite un rôle clé dans la répartition de la température. Les chicanes rectangulaires, avec leurs coins aigus, génèrent des zones de recirculation qui ralentissent localement l'air, permettant ainsi un échauffement progressif tout en favorisant un meilleur mélange vertical. Cela tend à homogénéiser la température sur toute la hauteur du canal. À l'inverse, les chicanes trapézoïdales, grâce à leurs formes inclinées, induisent un écoulement plus dirigé, réduisant les recirculations et maintenant une stratification thermique plus prononcée.

Un autre élément crucial à considérer est la surface latérale d'échange thermique des chicanes. Bien que les deux types de chicanes présentent des longueurs proches, leurs largeurs diffèrent. La surface latérale des chicanes trapézoïdales est nettement inférieure à celle des chicanes rectangulaires, ce qui réduit leur capacité d'échange thermique par convection. Cette surface réduite, combinée à l'absence de forte recirculation, entraîne une efficacité thermique générale plus faible pour les chicanes de forme trapézoïdale. Une fois passées les chicanes, l'air continue de se réchauffer légèrement dans les deux configurations, cependant, la température finale est plus élevée avec les chicanes rectangulaires, indiquant un transfert thermique globalement supérieur.

III.3.1.3. Profils de vitesse

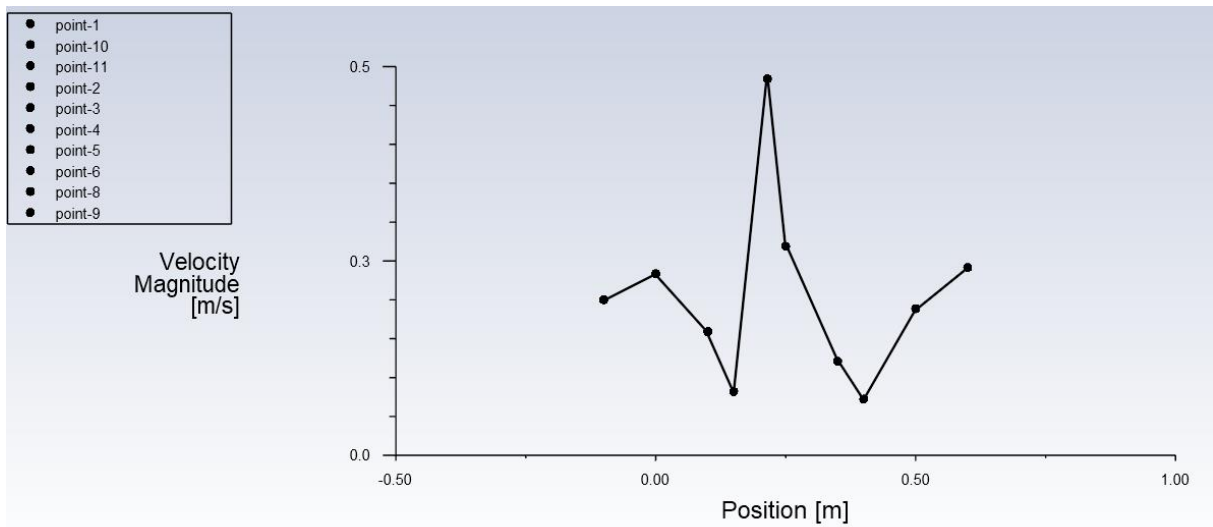


Figure III.37: Profil de vitesse d'un absorbeur avec chicane trapézoïdale

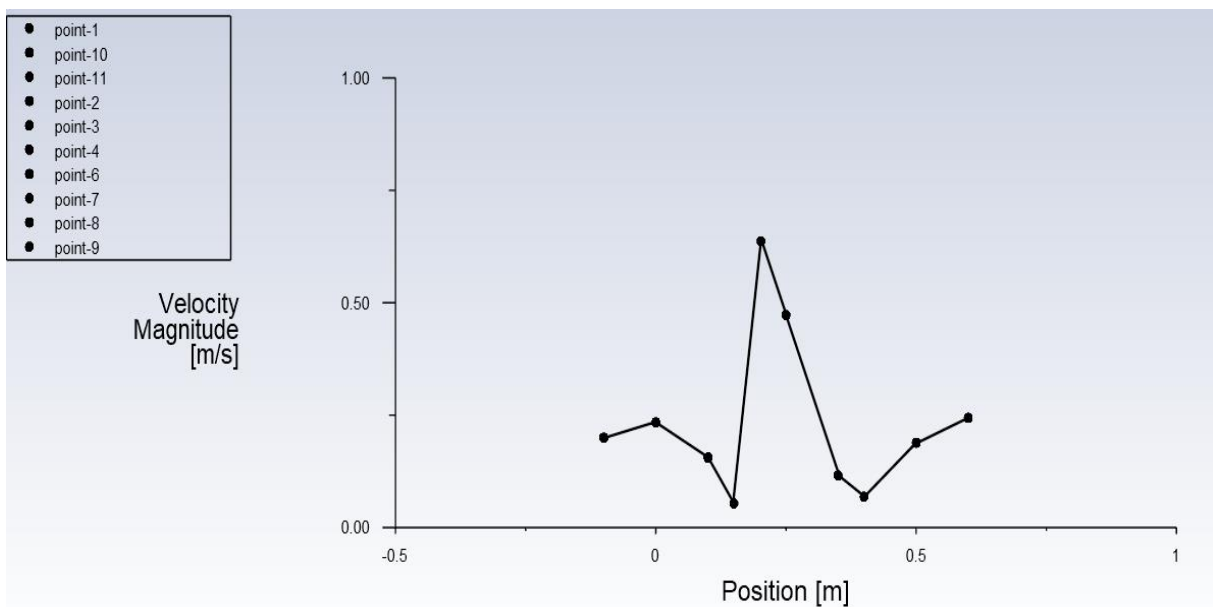


Figure III.38: Profil de vitesse d'un absorbeur avec chicane rectangulaire

Interprétation

Dans le profil de vitesse de l'absorbeur avec des chicanes rectangulaires, on remarque d'abord une légère diminution de la vitesse au début du canal. Cette baisse est due à l'élargissement de la section, ce qui ralentit le fluide. Par la suite, la vitesse augmente fortement dans les passages étroits entre les chicanes, où l'air est canalisé, ce qui provoque une accélération. On observe ensuite un nouveau ralentissement lorsque la section s'élargit à nouveau ou à cause de zones de

recirculation. Enfin, la vitesse augmente à nouveau à la sortie, grâce à la forme convergente de la section, qui incite naturellement le fluide à accélérer.

Dans le cas de l'absorbeur avec des chicanes trapézoïdales, le profil de vitesse a une forme très similaire en raison du maintien de la même configuration générale de la géométrie, des positions des chicanes et de la forme du canal. Les zones d'accélération et de ralentissement se situent aux mêmes emplacements. Toutefois, la vitesse maximale atteinte est inférieure, s'élevant à 0,52 m/s pour les chicanes trapézoïdales, comparativement à 0,65 m/s pour les chicanes rectangulaires. Cette différence vient de la forme des chicanes : les chicanes rectangulaires, avec leurs angles droits, créent des passages plus brusques et plus étroits, ce qui accélère davantage le fluide. Les chicanes trapézoïdales ont des bords inclinés, ce qui rend l'écoulement plus doux, mais limite l'accélération maximale. Par conséquent, bien que les deux profils soient très proches, la géométrie rectangulaire entraîne une vitesse supérieure en raison de ses effets de compression accentués.

III.3.1.4. Profils de température

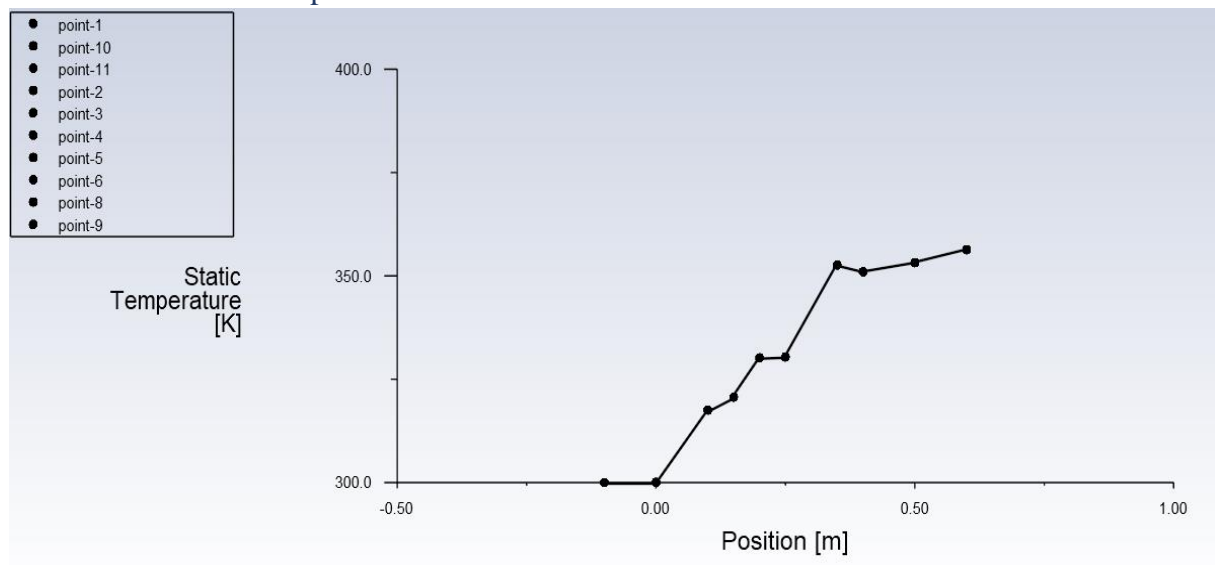


Figure III.39: Profil de température d'un absorbeur avec chicanes trapézoïdales

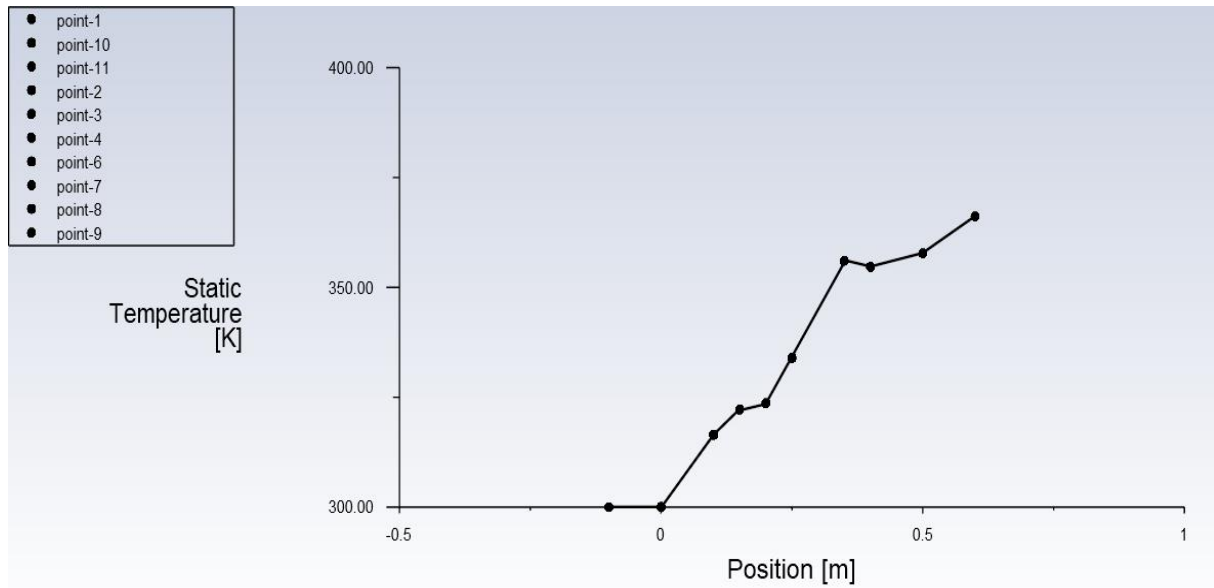


Figure III.40: Profil de température d'un absorbeur avec chicanes rectangulaires

Interprétation

Dans le profil de température de l'absorbeur avec des chicanes rectangulaires on remarque que la température de l'air progresse de manière continue tout au long de l'absorbeur. On voit des montées régulières de température, parfois entrecoupées de légères zones plus stables, ce qui correspond aux zones d'accélération et de ralentissement de l'air. La température maximale atteinte dans cette configuration est plus élevée, grâce à la conception des chicanes rectangulaires. Leur forme plus large et leur surface d'échange plus grande favorisent un transfert thermique amélioré entre les parois chauffées et le fluide.

Dans le cas de l'absorbeur avec des chicanes trapézoïdales, le profil thermique garde une allure similaire, avec une augmentation progressive de la température, en raison de la ressemblance générale de la géométrie. Toutefois, la température maximale atteinte est légèrement inférieure à celle observée dans les chicanes rectangulaires. Cette différence s'explique par la surface d'échange des chicanes trapézoïdales, qui est plus petite, réduisant ainsi légèrement le transfert de chaleur. De plus, l'inclinaison des chicanes permet au fluide de circuler plus aisément, ce qui diminue le temps de contact avec les parois chauffées. En conclusion, bien que les deux profils soient très semblables, la configuration rectangulaire engendre un réchauffement plus prononcé grâce à des surfaces d'échange plus grandes et à un ralentissement local plus accentué.

III.3.2. L'effet du débit :

L'ajustement du débit d'entrée offre la possibilité d'examiner l'influence du flux sur le réchauffement du fluide et la répartition de la vitesse au sein de l'absorbeur. Donc on augmente la vitesse d'entrée (0,2 m/s, 0,5 m/s, 0,8 m/s).

3.2.1. Champs de vitesse

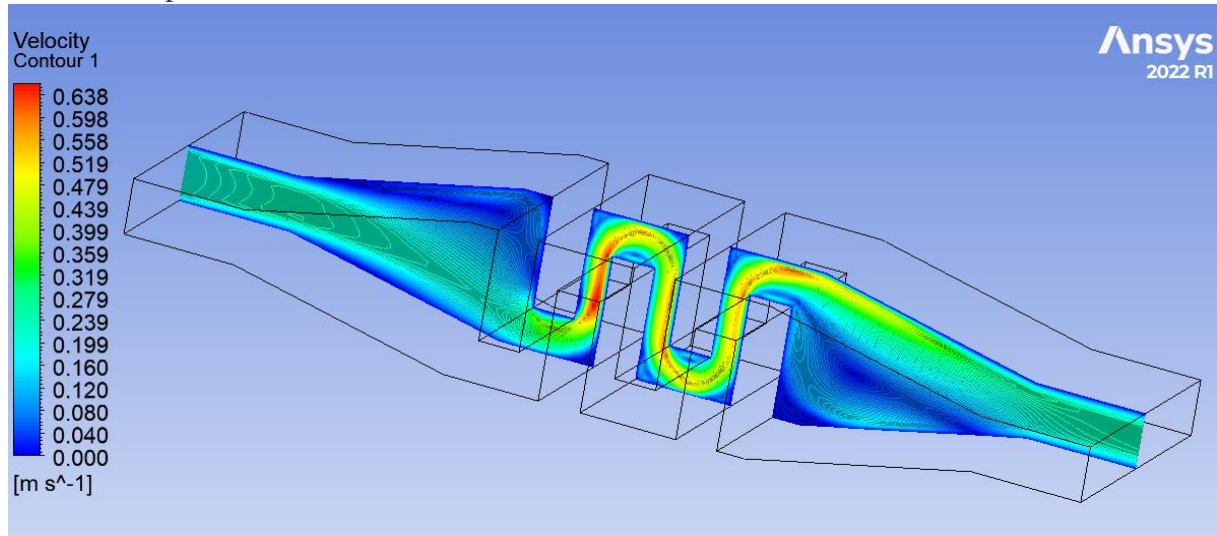


Figure III.41:Contour de vitesse avec $V_e = 0.2$ m/s

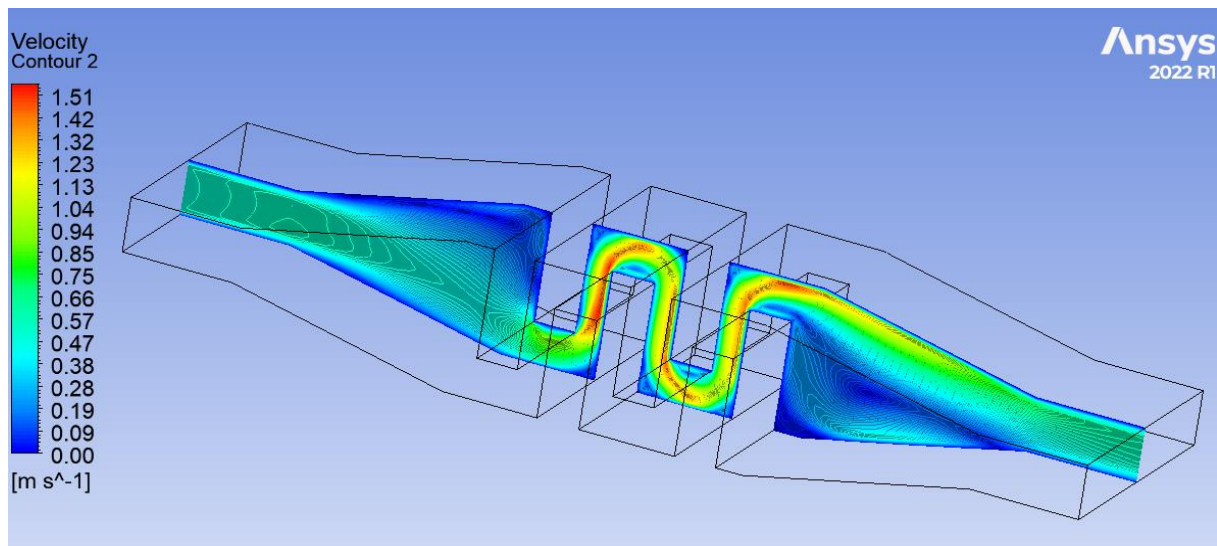


Figure III.42:Contour de vitesse avec $V_e = 0.5$ m/s

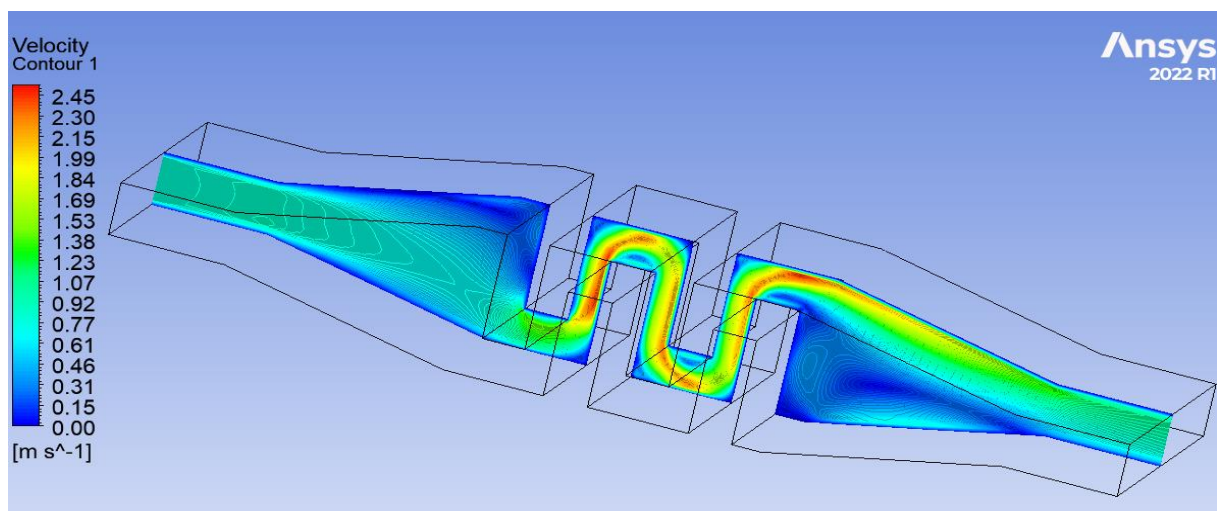


Figure III.43:Contour de vitesse avec $V_e = 0.8$ m/s

Interprétation

Les profils de vitesse obtenus pour les trois vitesses d'entrée (0,2, 0,5 et 0,8 m/s) révèlent que la structure globale de l'écoulement demeure inchangée. Cela est prévisible puisque la géométrie de l'absorbeur reste identique. Les zones d'accélération dans les passages étroits entre les chicanes, ainsi que les zones de basse vitesse près des parois, sont qualitativement conservées. Cependant, à mesure que la vitesse d'entrée augmente, on constate une hausse progressive de la vitesse dans toutes les parties du domaine. Cela correspond à une augmentation de débit volumique, puisque la section reste constante. En terme physique, cela signifie que plus de masse d'air traverse l'absorbeur par unité de temps, conduisant à des vitesses locales plus élevées à travers tout le domaine. L'inertie du fluide devient plus dominante, rendant l'écoulement plus direct et plus intense, sans modifier fondamentalement le schéma de circulation établi à faible vitesse.

III.3.2.2. Champs de température

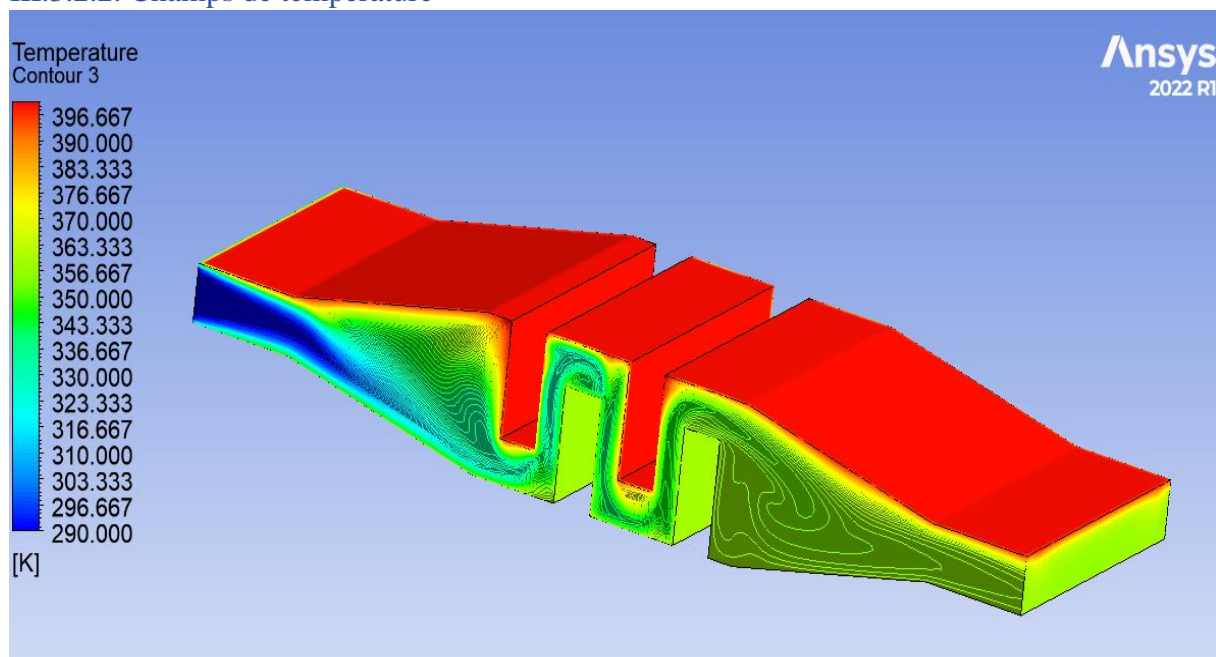


Figure III.44: Contour de température avec $V_e = 0.2$ m/s

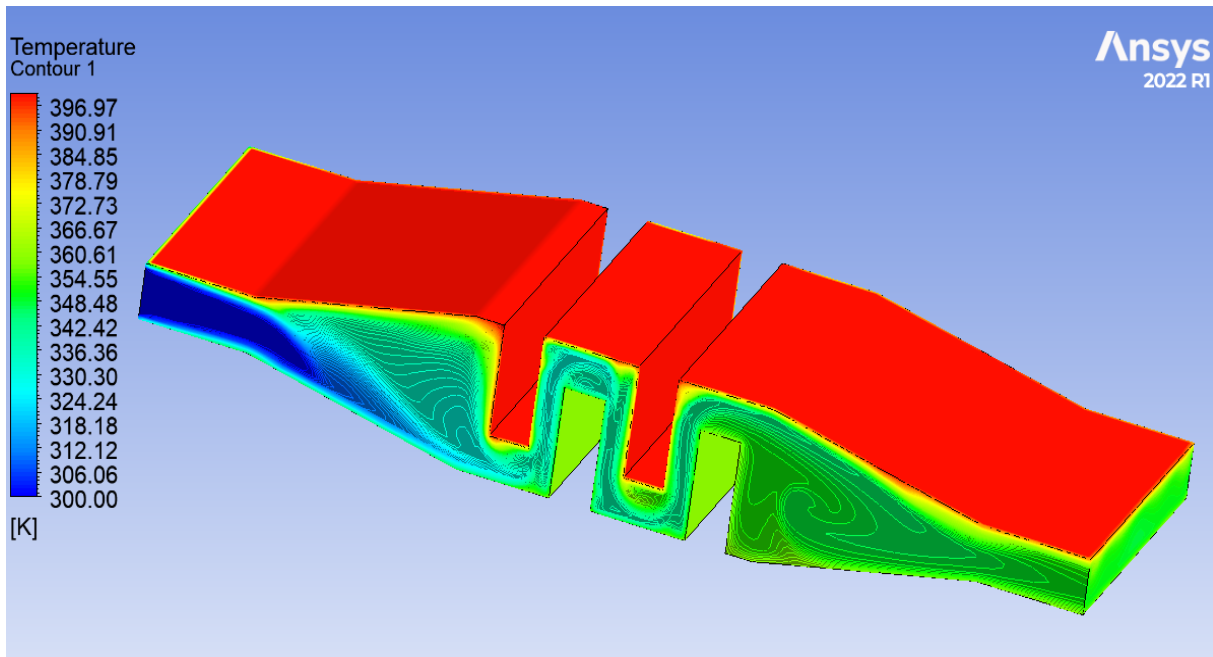


Figure III.45: Contour de température avec $V_e = 0.5$ m/s

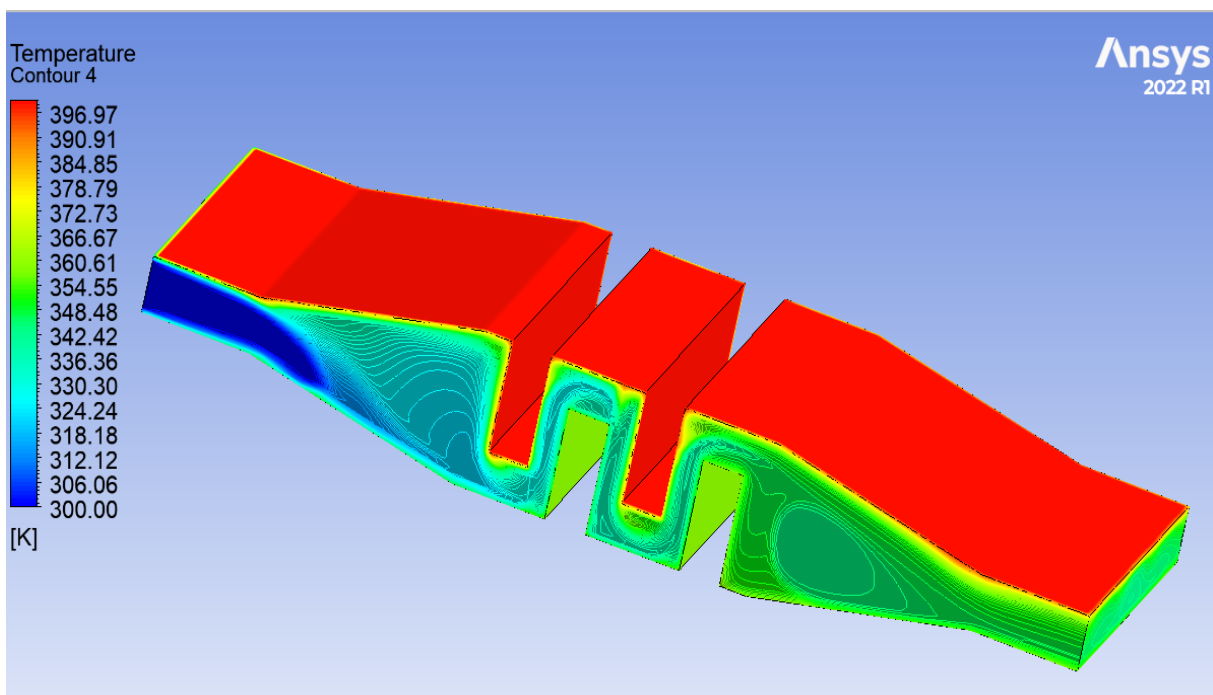


Figure III.46: Contour de température avec $V_e = 0.8$ m/s

Interprétation

L'analyse des contours de température pour les trois vitesses d'entrée révèle que même si la distribution spatiale de la température reste similaire dans chaque cas, la température globale du fluide diminue progressivement avec l'augmentation de la vitesse. Cette évolution est liée à l'augmentation du débit d'air traversant l'absorbeur ce qui signifie plus le débit est élevé, plus la masse d'air entrant par unité de temps est importante. Cependant, puisque la puissance

thermique échangée par les parois reste constante (avec des températures de paroi inchangées), chaque "portion" d'air passe moins de temps dans l'absorbeur et absorbe donc moins de chaleur. En conséquence, la température de sortie baisse, même si le transfert de chaleur global peut toujours être significatif. On remarque que les zones les plus chaudes se situent principalement autour des chicanes et des parois, bien que les couleurs perdent en intensité, ce qui indique un échauffement moins performant du fluide en mouvement rapide. Cela démontre parfaitement le compromis entre un débit élevé et l'efficacité thermique dans un échangeur de type absorbeur solaire.

III.3.2.3. Profils de vitesse

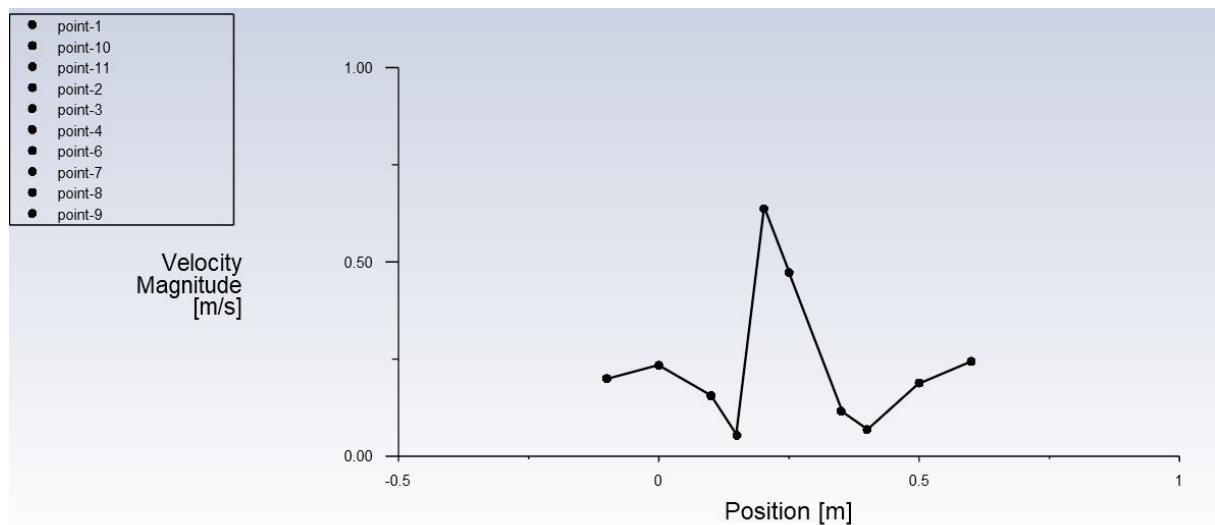


Figure III.47: Profil de vitesse avec $V_e=0.2\text{m/s}$

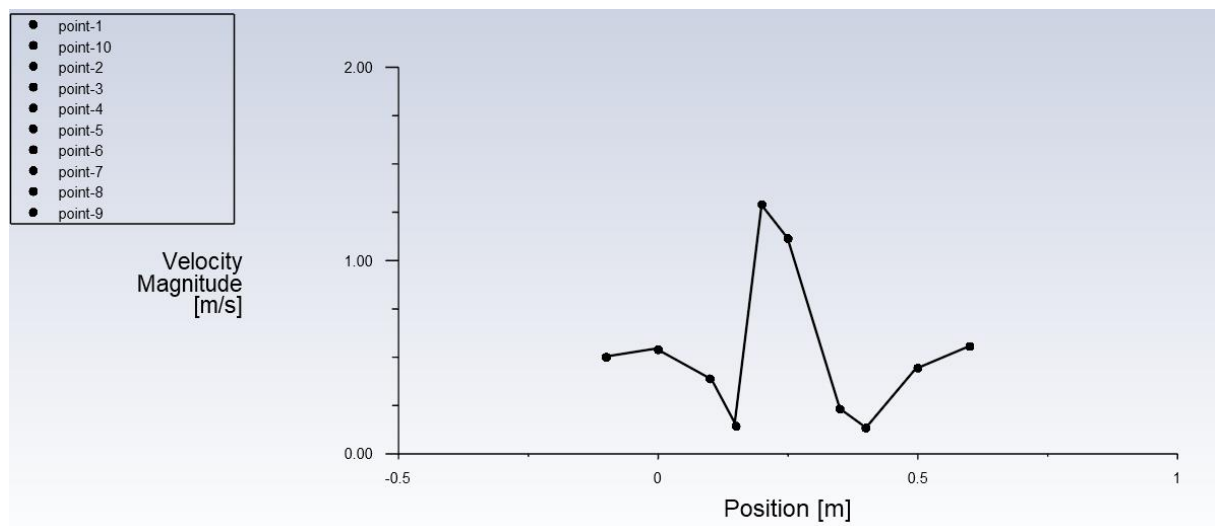


Figure III.48: Profil de vitesse avec $V_e=0.5\text{m/s}$

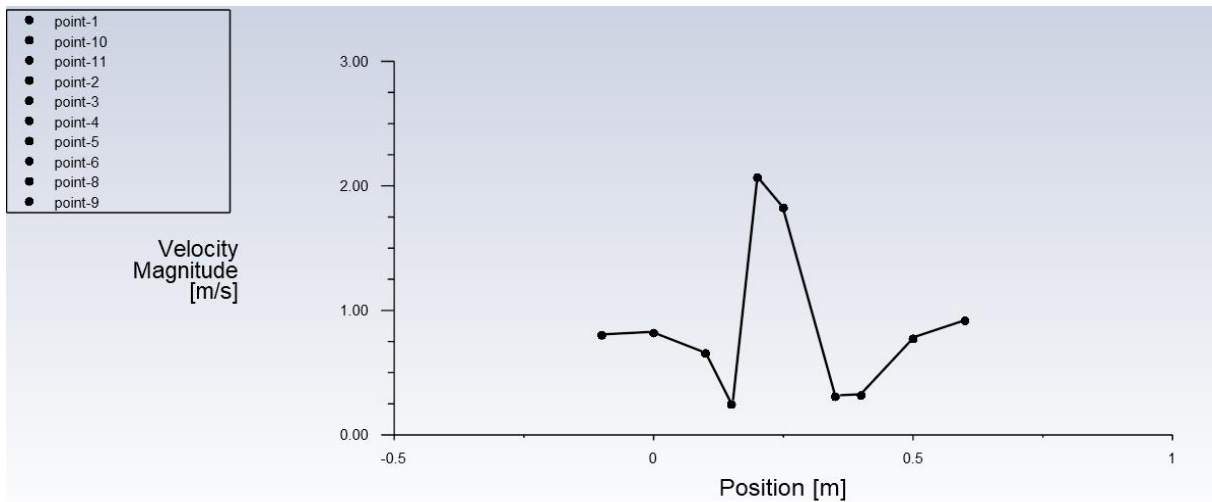


Figure III.49: Profil de vitesse avec $V_e=0.8\text{m/s}$

Interprétation

On remarque une forme très semblable pour les profils de vitesse dans les trois vitesses d'entrée (0.2, 0.5 et 0.8 m/s), avec une succession de pics et de creux aux mêmes positions le long de l'absorbeur. Cette constance géométrique indique que la structure de l'écoulement est principalement dictée par la configuration interne du canal : les accélérations se produisent dans les passages étroits entre les chicanes, tandis que les réductions de vitesse surviennent dans les zones plus larges ou de recirculation. Ce qui différencie les courbes, ce sont les valeurs absolues de la vitesse, qui augmentent avec la vitesse d'entrée. À mesure que le débit augmente, on observe un rehaussement global du profil, sans modification de sa forme. Cela traduit un écoulement plus énergétique, mais structuré de la même manière, ce qui signifie que la dynamique du fluide reste contrôlée par la géométrie, même à haute vitesse.

III.3.2.4. Profils de température

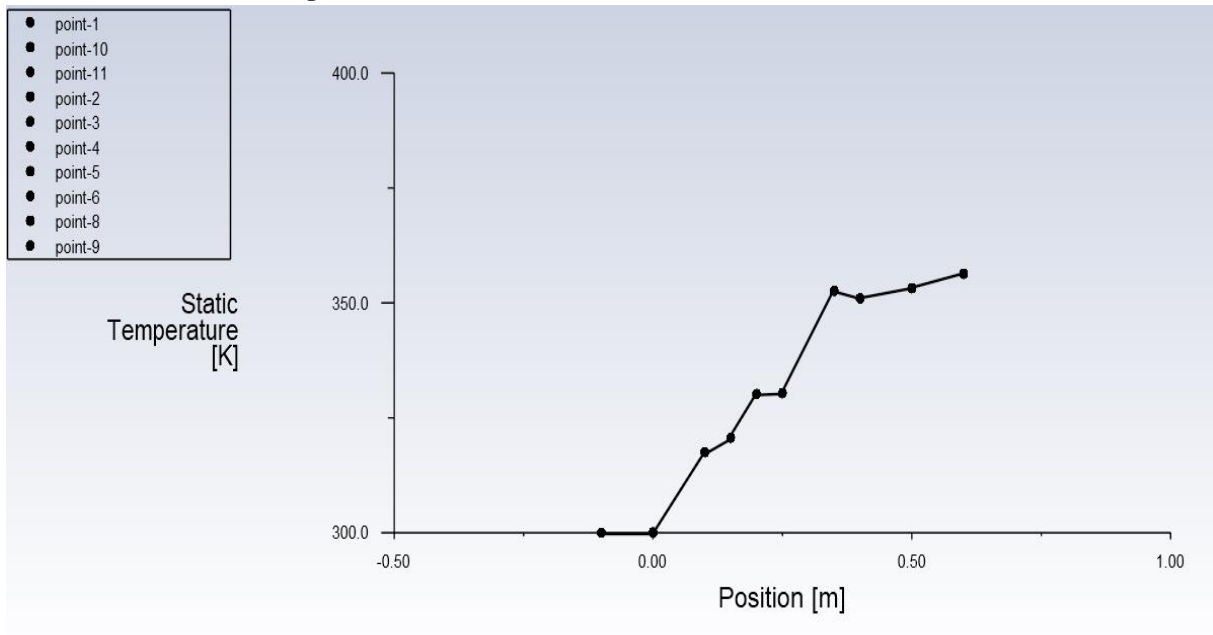


Figure III.50: Profil de température avec $V_e=0.2$ m/s

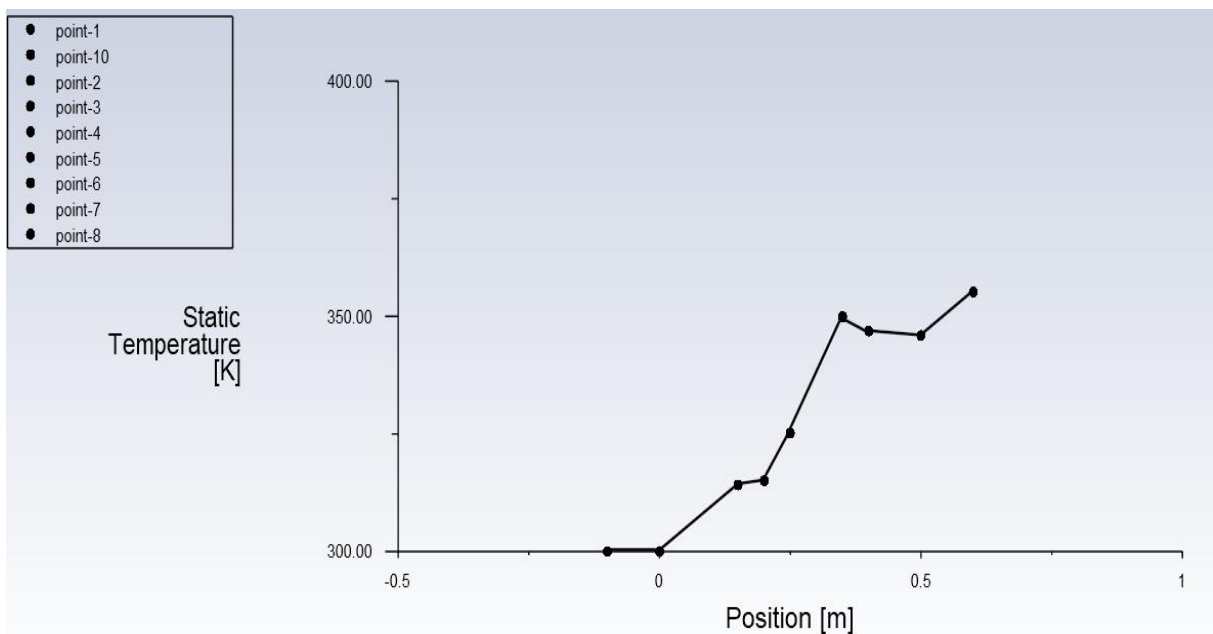


Figure III.51: Profil de température avec $V_e=0.5$ m/s

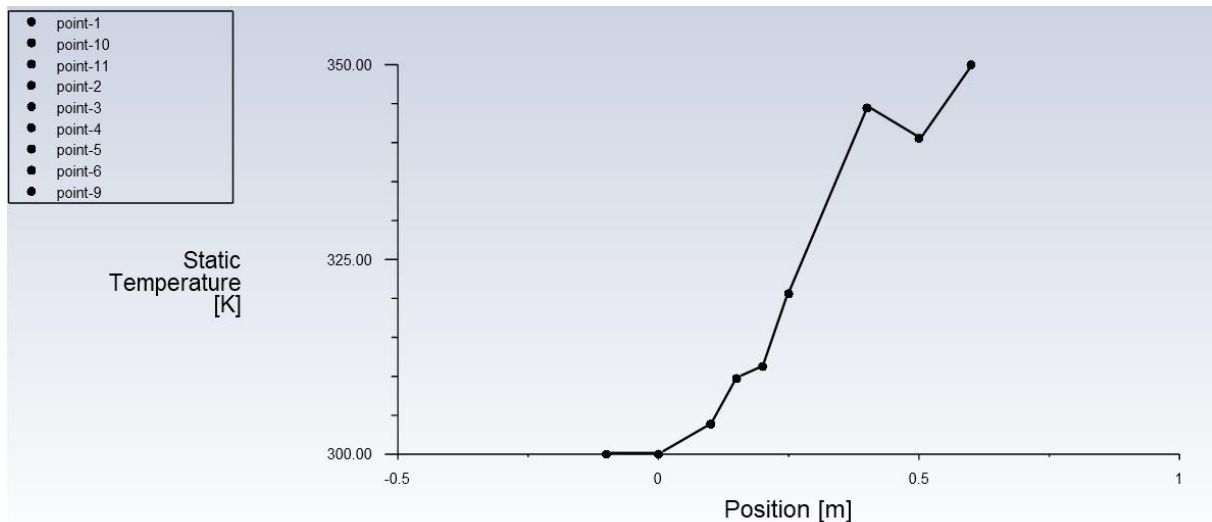


Figure III.52: Profil de température avec $V_e=0.8$ m/s.

Interprétation

Les profils de température pour les trois vitesses d'entrée (0.2, 0.5 et 0.8 m/s) illustrent la progression du réchauffement de l'air le long de l'absorbeur. Pour chaque cas, la température s'élève graduellement de l'entrée à la sortie, en réponse au transfert thermique avec les parois avec les parois chauffées. Cependant, on observe que plus la vitesse d'entrée est grande, plus le profil global se réduit. Cela reflète un phénomène physique clair : lorsque le débit augmente, la masse d'air traversant l'absorbeur par unité de temps devient plus importante, ce qui réduit le temps de séjour de chaque particule d'air à l'intérieur du canal. En conséquence, l'air est moins exposé à la chaleur des parois, et n'a pas le temps d'atteindre une température aussi élevée. En comparant les courbes, on remarque que la forme générale des profils reste similaire, avec une montée progressive, mais que les valeurs de température sont plus basses à chaque point X lorsque la vitesse augmente. Le profil à 0.2 m/s montre un réchauffement plus lent mais plus complet, tandis que le profil à 0.8 m/s montre un réchauffement plus rapide au début, mais sature vite à une température inférieure. Ceci met en évidence le compromis entre débit élevé et efficacité thermique dans le transfert de chaleur par convection forcée.

III.3.3. Effet des propriétés thermophysiques du fluide

Le changement de fluide utilisé dans l'absorbeur permet d'étudier l'influence des propriétés physiques sur le réchauffement du fluide et le comportement de l'écoulement. Pour cela, une comparaison a été réalisée entre l'air et l'eau à vitesse d'entrée constante.

3.3.1. Champs de vitesse

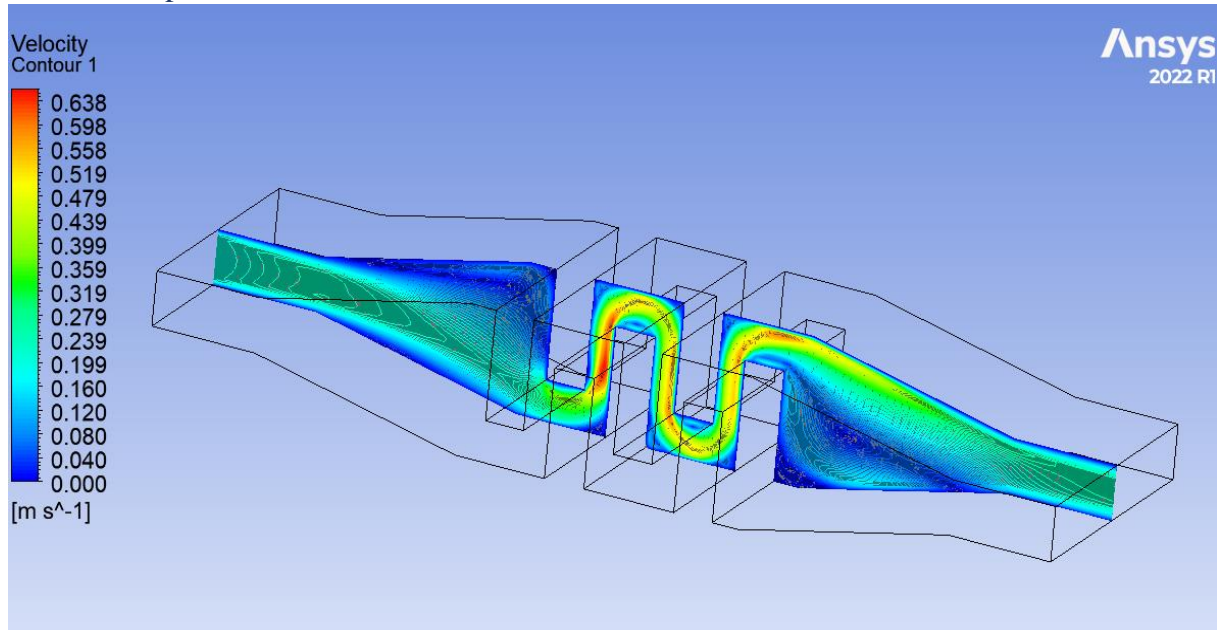


Figure III.53: Contour de vitesse d'un absorbeur à air

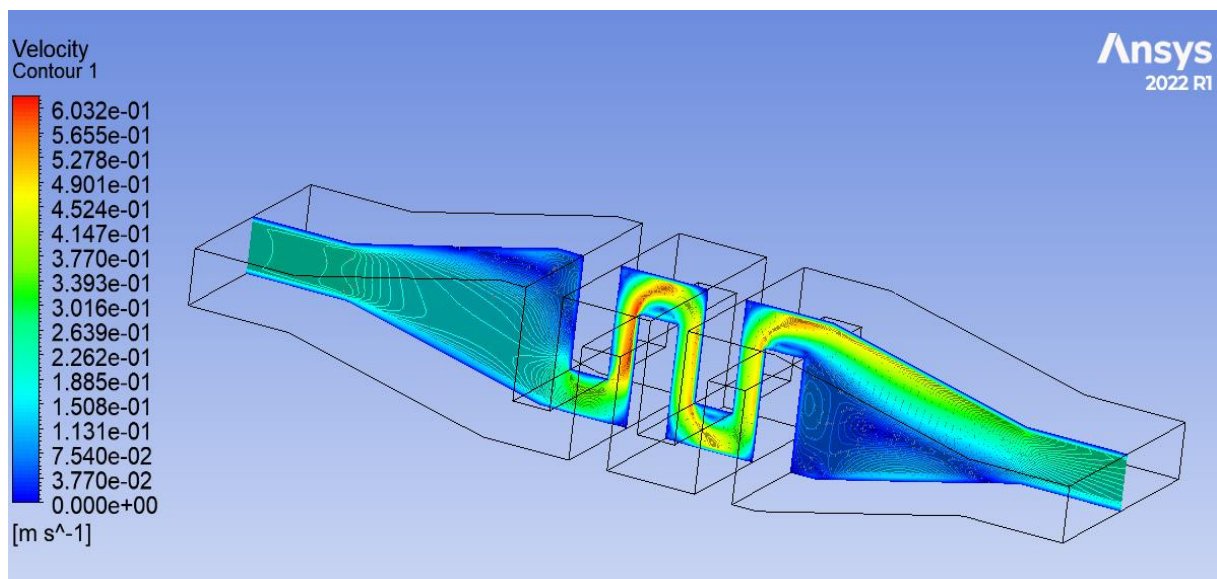


Figure III.54: Contour de vitesse d'un absorbeur à eau

Interprétation

Comparé à l'air, le profil de vitesse obtenu avec l'eau indique que l'écoulement est plus uniforme et moins rapide dans certaines régions. Même si la vitesse d'entrée est la même (0.2 m/s), on remarque que l'eau accélère moins dans les passages étroits entre les chicaneuses. Ceci est dû aux propriétés physiques de l'eau : sa viscosité dynamique est plus élevée et sa densité est plus importante que celles de l'air. À cause de cela, l'eau réagit moins rapidement aux changements de forme dans le canal. L'air, plus léger et moins visqueux, s'accélère facilement quand la section se resserre, ce qui crée de fortes variations de vitesse. L'eau, au contraire, circule de façon plus

douce, avec moins de différences entre les zones rapides et les zones lentes. Le mouvement de l'eau est donc plus uniforme, même si la structure générale du champ de vitesse reste la même, car elle dépend surtout de la forme de l'absorbeur.

III.3.3.2. Champs de température

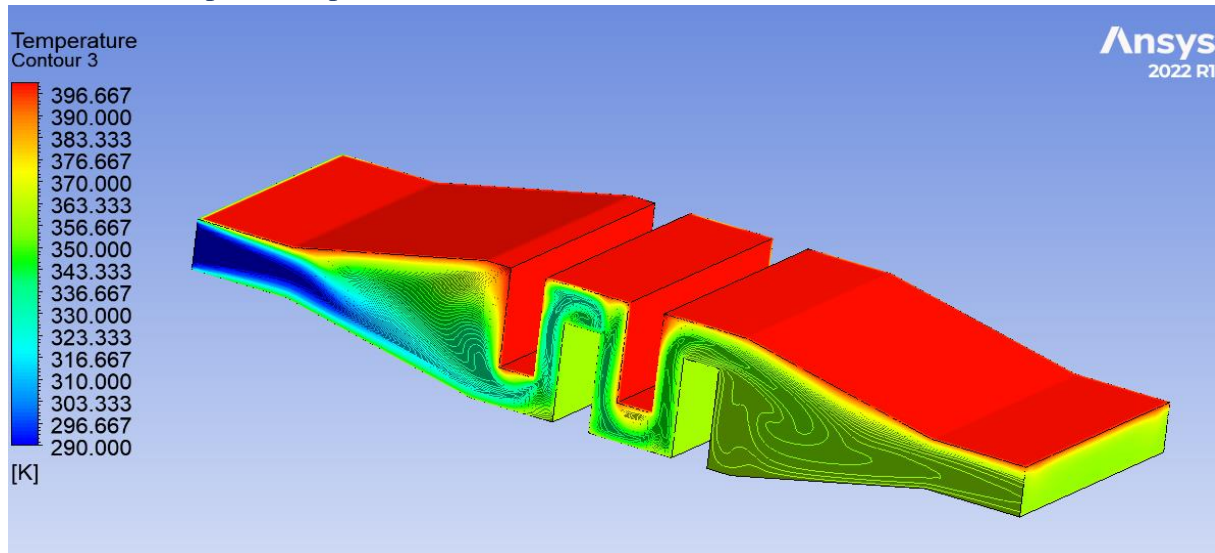


Figure III.55: Contour de température d'un absorbeur à air

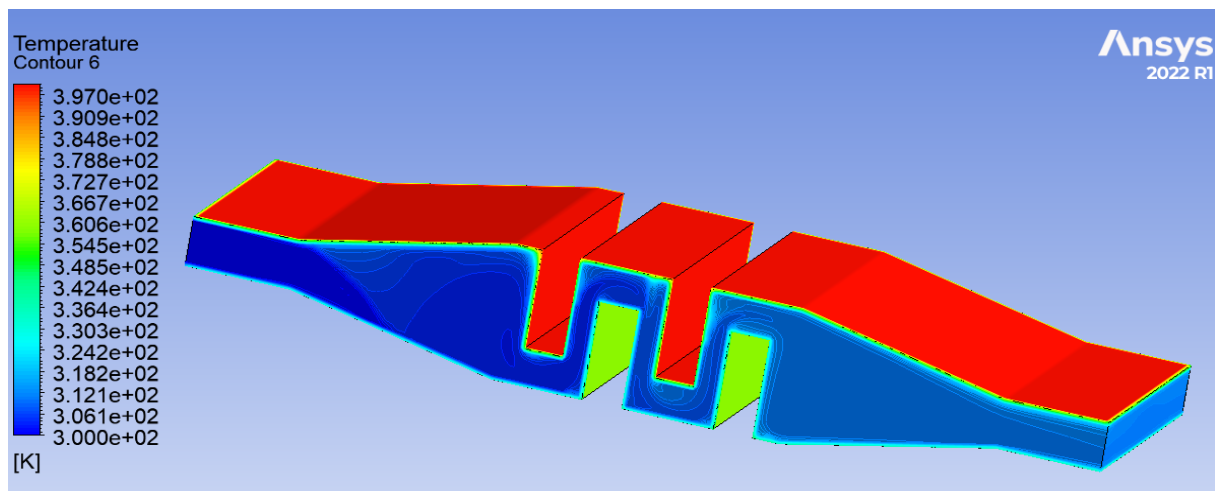


Figure III.56: Contour de température d'un absorbeur à eau

Interprétation

Par rapport à l'air, on constate que l'eau chauffe beaucoup moins à l'intérieur de l'absorbeur. Bien que les deux fluides soient introduits à la même température et traversent les mêmes parois chauffées, l'eau est sortie avec une température nettement inférieure à celle de l'air. Cela s'explique par une propriété importante : l'eau a une chaleur massique beaucoup plus grande que celle de l'air. Cela veut dire que pour augmenter sa température, l'eau a besoin de beaucoup plus d'énergie que l'air. Autrement dit, l'eau chauffe plus lentement, même si elle absorbe une grande quantité de chaleur. Dans le contour, on voit que la température de l'eau reste plus basse dans

tout l'absorbeur, à l'exception des zones près des parois où elle est en contact direct avec la source chaude. Cela montre que l'eau transporte bien la chaleur, mais sans que sa température augmente beaucoup, contrairement à l'air qui chauffe très vite avec peu d'énergie. C'est pour cette raison que la température de sortie de l'air est plus élevée que celle de l'eau.

III.3.3.2. Profils de vitesse

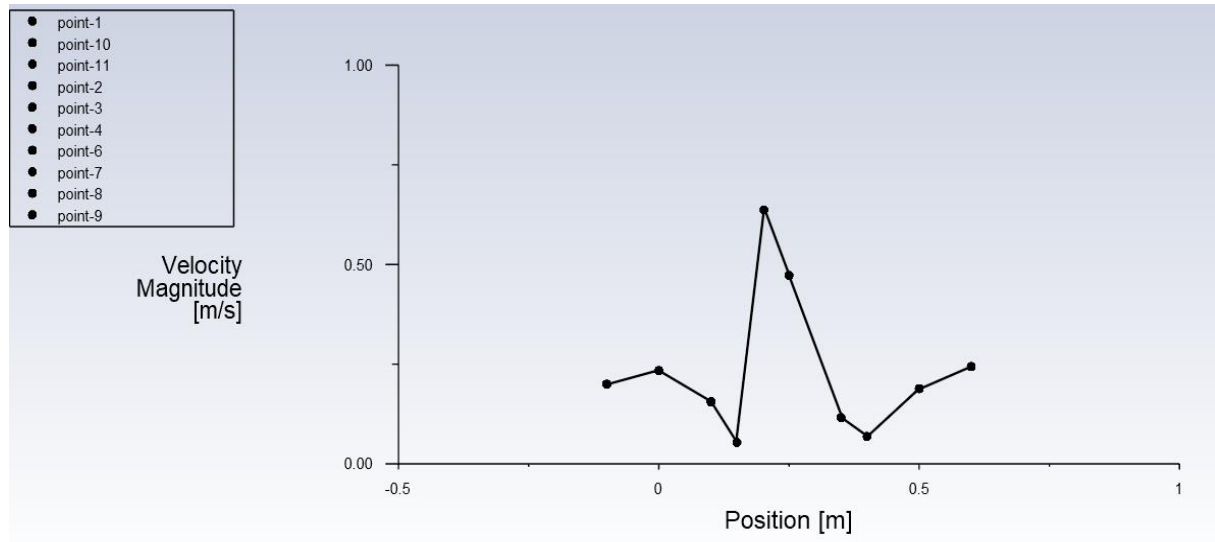


Figure III.57: Profil de vitesse d'un absorbeur a air

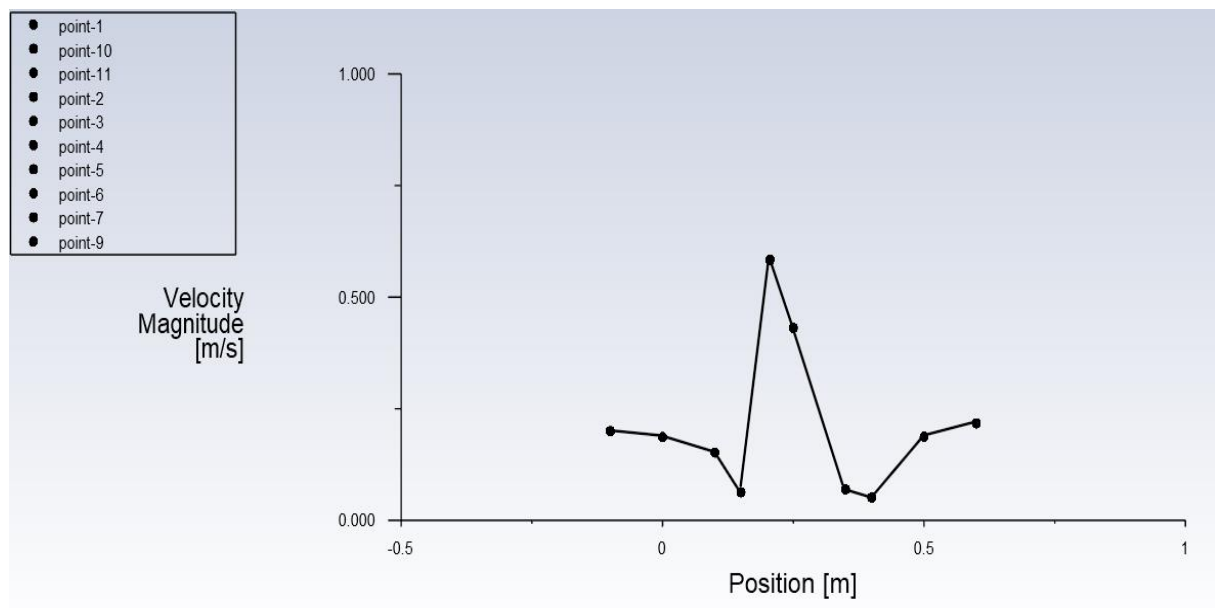


Figure III.58: Profil de vitesse d'un absorbeur a eau

Interprétation

On remarque une similitude dans les profils de vitesse de l'air et de l'eau dans l'absorbeur, avec des zones d'accélération bien marquées entre les chicanes. Cela indique que la configuration du canal entraîne un comportement d'écoulement identique pour les deux fluides. L'unique

différence significative est que l'air atteint une vitesse maximale un peu plus élevée (0.65 m/s) comparativement à l'eau (0.59 m/s). Cette variation est due aux caractéristiques physiques : l'air, étant moins dense et moins visqueux, se déplace plus aisément dans les espaces étroits. L'eau, plus dense et plus visqueuse, réagit un peu plus lentement. Mais au final, les deux fluides suivent presque la même trajectoire et le même rythme dans l'absorbeur.

III.3.3.2. Profils de température

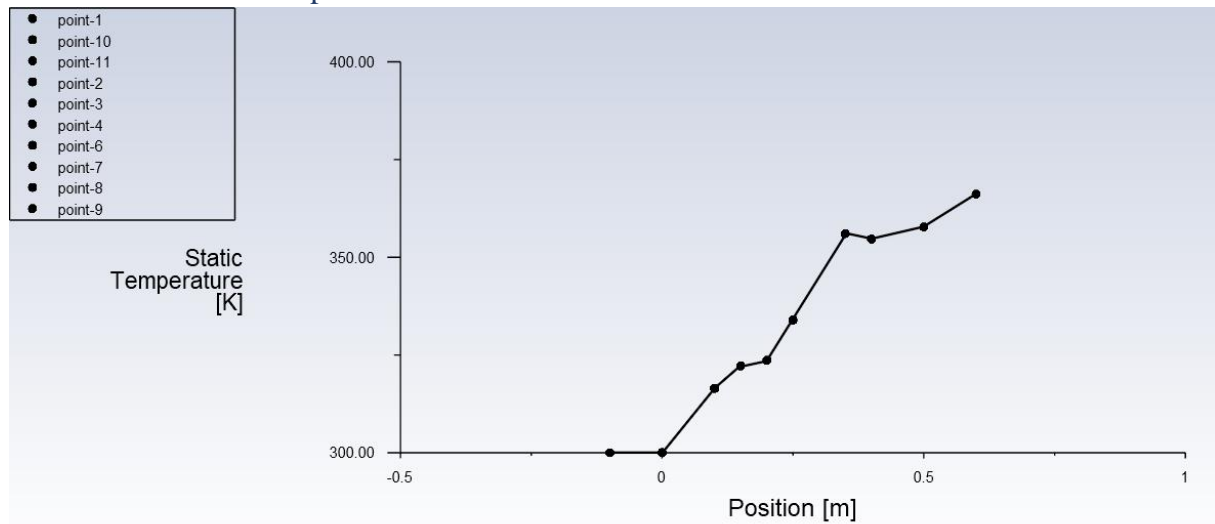


Figure III.59: Profil de température d'un absorbeur à air

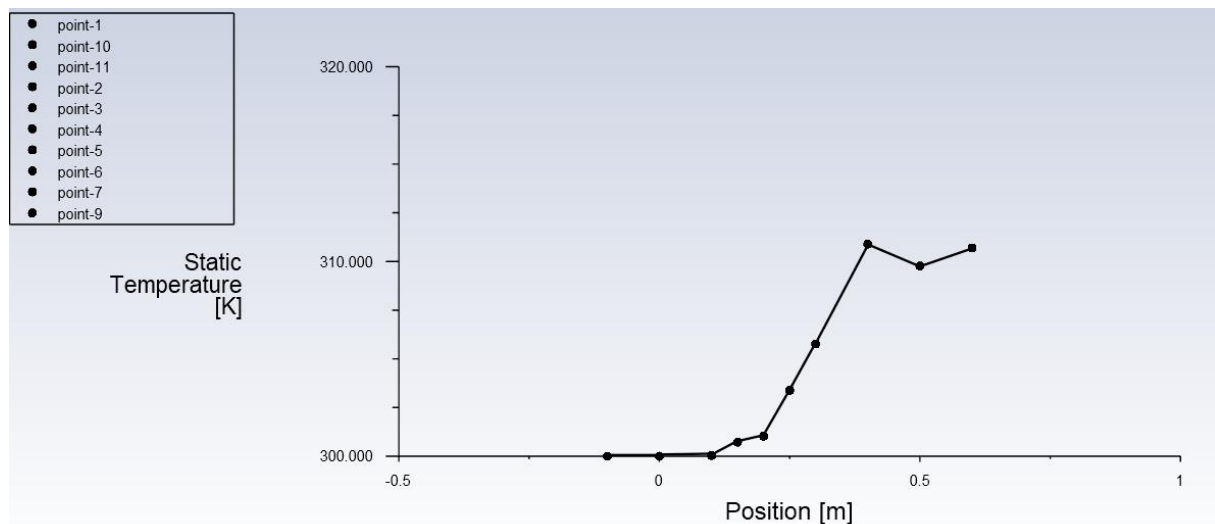


Figure III.60: Profil de température d'un absorbeur à eau

Interprétation

Le long de l'absorbeur, les profils de température de l'air et de l'eau présentent une évolution semblable : la température s'élève progressivement à mesure que le fluide avance et reçoit de la chaleur depuis les parois chauffées. Cependant, on constate que l'air atteint une température beaucoup plus élevée à la sortie (365 K), alors que l'eau monte à peine à 312 K, malgré les mêmes

conditions. Cette différence s'explique par le fait que l'eau a une chaleur massique plus élevée que l'air, ce qui signifie qu'elle a besoin de plus d'énergie pour augmenter sa température. L'air, au contraire, chauffe très rapidement même avec peu de chaleur. Ainsi, dans le graphe, on voit que la courbe de température de l'eau reste plus basse sur tout le trajet, alors que celle de l'air monte rapidement. Cela montre que l'eau absorbe bien la chaleur, mais sa température augmente plus lentement, alors que l'air chauffe vite mais transporte moins d'énergie totale.

Conclusion générale

Ce travail vise à examiner l'efficacité thermique d'un capteur solaire Grâce à des simulations numériques, nous avons pu déterminer comment les températures et la vitesse dans des différents composants du capteur solaire évoluent et comment certains paramètres affectent son efficacité thermique. Cette étude a été réalisée à l'aide du code de calcul fluent basée sur la méthode des volumes finis.

Dans l'étude du capteur solaire nous avons changé la forme des chicanes, la vitesse d'entrée et le fluide pour faire une comparaison entre les températures du fluide a la sortie et montrer ainsi l'influence de la géométrie des chicanes, le débit et les propriétés thermophysiques du fluide sur les performances du capteur solaire.

Les contours de température et de vitesse dans le capteur ont été obtenus pour tous les composants du capteur. Les profils de température et de vitesse sont traités le long du capteur suivant la trajectoire de l'écoulement pour différentes positions.

Les résultats obtenus montrent l'influence du débit, de la forme des chicanes et du propriétés thermophysiques du fluide sur l'efficacité thermique du capteur solaire. L'accroissement du débit réduire le temps de séjour du fluide dans le capteur, ce qui entraîne un échauffement insuffisant du fluide. Cependant, avec des débits bas, le fluide aura assez de temps pour un bon réchauffement.

La géométrie des chicanes influe aussi sur 'efficacité thermique du capteur solaire. L'augmentation de la surface d'échange permet d'optimiser le transfert de chaleur entre les parois chauffées et le fluide, ce qui améliore le réchauffement de ce dernier.

Aussi Le type de fluide a également un impact sur les performances du capteur solaire. Un fluide tel que l'air, possédant une faible capacité thermique massique, se réchauffe rapidement même avec une petite quantité d'énergie, mais ne peut stocker qu'une faible quantité de chaleur. À l'opposé, l'eau, avec sa capacité thermique massique plus élevée, augmente peu en température car elle nécessite plus d'énergie pour se réchauffer, mais elle peut absorber et transporter une plus grande quantité de chaleur, ce qui améliore son efficacité thermique.

Ces résultats confirment l'importance du choix des paramètres géométriques, dynamiques et thermophysiques dans la conception des capteurs solaires, et ouvrent la voie à une optimisation plus fine de ces systèmes pour améliorer leur performance énergétique.

Bibliographie

- [1] A. Brahimi, « Etude de performances d'un capteur solaire plan à eau », Mémoire de master, Alger, 2016.
- [2] Z. Sen, « Solar energy fundamentals and modeling techniques, Springer », (2008).
- [3] M Chassériau, « Conversion thermique du rayonnement solaire » ; Dunod, 1984.
- [4] R. Bernard, G. Menguy, M. Schwartz, « Le rayonnement solaire conversion thermique et Applications », Technique et documentation, Paris, 1983.
- [5] N. Nadji, « Étude des performances d'un capteur solaire plan à conversion thermique », mémoire de master, Annaba, 2018.
- [6] S. Saadi, « Effet des paramètres opérationnels sur les performances d'un capteur solaire plan », Mémoire de magistère, Constantine, 2010.
- [7] A. Belaid Mouffok et I. Benaouda, « Bilan énergétique d'un capteur solaire plan à air », mémoire de master, Tlemcen, 2021.
- [8] H. Ben Cheikh, « Modélisation nanothermique des systèmes Thermo/Photovoltaïques Applications aux collecteurs hybrides PVT », Thèse de doctorat, Constantine ,2017.
- [9] Y. Mouhadjer et N. Hamel, « Étude de l'influence des paramètres (astronomique et dynamique) sur les performances d'un capteur solaire plan à air », Mémoire de master, Tlemcen, 2015.
- [10] Sandnes Bjornar, Rekstad John, « A photovoltaic/thermal (PV/T) collector with a polymer absorber plate », Experimental study and analytical model, Sol Energy 2002; 72(1) :63–73.
- [11] M. Sandali, « Etude dynamique et thermique d'un capteur solaire à air à double passe avec milieu poreux », mémoire de magistère, Tlemcen, 2013.
- [12] T. Omari, « Modélisation numérique d'un capteur-stockeur solaire », Mémoire de Magister, Médéa, 2009.
- [13] A. Daas, « Amélioration d'un capteur solaire plan à air double passe muni des ailettes », Mémoire de master, Mila, 2023.

- [14] Z. Dehiri, « Etude numérique d'un capteur solaire thermique plan dans la région de Boussaâda » Mémoire de master, M'sila, 2018.
- [15] M. Moussaoui, « Calcul cognitif des facteurs de forme radiatifs dans les capteurs solaires », Mémoire de Magister, Médéa, 2010.
- [16] A. Si Chaib, « Etude numérique d'une chaîne énergétique solaire avec capteur solaire plan à air et stockage thermique pour une maison solaire », Mémoire de Magister, Tlemcen, 2013.
- [17] K. Kaci, « Influence de l'angle d'incidence modifié sur les performances d'un capteur solaire plan », Mémoire de Magister, Ecole doctorale énergies renouvelables, 2010.
- [18] L. Bouragbi, « Conception et optimisation des performances d'un capteur solaire plan », Thèse de doctorat, 2024
- [19] T. Bellakhdar et O. Benadla, « Amélioration des performances thermique d'un capteur solaire plan à air », Mémoire de master, Ain-Temouchent, 2020
- [20] M. Amraoui, « Etude numérique d'un capteur solaire plan à air Influence de la forme de la rugosité », Mémoire de Magister, Tlemcen, 2012.
- [21] F. Sobhi, « Amélioration de l'efficacité énergétique par l'intégration de systèmes solaires sur les parois verticales des locaux : Expérimentation sur site », Mémoire de master, Ouargla, 2019.
- [22] A.T. Ferdjani, « Développement d'un logiciel de simulation des performances thermiques des capteurs solaires plans », Mémoire de Magister, Biskra, 2013.
- [23] Cheng Chin-Hsaing and Huang Wen-Hsiung, (1991) « Numerical prediction for laminar forced convection in parallel-plate channels with transverse fin arrays » International Journal of Heat and Mass Transfer, Volume 34, Issue 11, PP.2739-2749.
- [24] B. Adgager, « Etude expérimentale des performances des capteurs solaires plans à air destiné aux applications séchage », Mémoire de master, Ouargla, 2015.
- [25] W. Ghaiba et F. Miloudi et M. Lobza, « Etude Théorique et réalisation d'un capteur solaire plan », Mémoire de master, Ouargla, 2022.
- [26] H. Bouziane et R. Chalabi, « Amélioration le rendement des capteurs solaires plans à eau par qualité des matériaux », Mémoire de master, Tlemcen, 2014.

- [27] J. Bernard, « Energie solaire calculs et optimisation, Ellipse Edition Marketing », 2004.
- [28] S. Slimane, « Etude du comportement thermique et dynamique d'un capteur solaire plan à air en présence des chicane transversales », Mémoire de master, Tiaret, 2019.
- [29] Pavel Charvat, Tomas Mauder « A Solar air collector with integrated latent heat thermal storage », Article en The Europe Physical Journal Conferences, November 2011.
- [30] S. Youcef-Ali, « Study and optimization of the thermal performances of the offset rectangular plate fin absorber plates, with various glazing », Renewable Energy, 2005.
- [31] M. Djennad et S. Moussi, « Etude des performances d'un capteur solaire thermique à bosses », Mémoire de master, Boumerdes, 2021.
- [32] D.K. Edwards, « Capteurs solaires », Edition SCM, paris. (1979).
- [33] A. Idir et I. Kerkour, « Etude des performances d'un capteur solaire thermique plan », Mémoire de master, Bejaia, 2020.
- [34] Z. Cherhabil et R. Mouafak, « Etude de l'influence des paramètres internes sur un capteur solaire », Mémoire de master, Msila, 2021.
- [35] Y. Maigne, J-P. Causse, M. Claverie, B. Equer. "les perspectives de l'énergie solaire en FRANCE". Commission « Energie et changement climatique » Groupe de travail « Energie solaire » Juillet 2008.
- [36] N. Diarra, « Optimisation des performances d'un capteur solaire à air et estimation des coefficients d'échange paroi-fluide », Thèse de doctorat, Sénégal, Dakar, 2018.
- [37] M. Akermi, « contribution à l'étude d'un capteur solaire thermodynamique thermosiphon à eau et application aux sites de Tiaret et Adrar », Mémoire de Magister, Tlemcen.
- [38] M. Bouazza, « Analyse de comportement thermique instationnaire d'un capteur solaire plan à air avec recirculation », Mémoire de master, Naama, 2017.
- [39] A. Dahmani et S. Souidi, « Modélisation des capteurs solaires plans à air munis des ailettes et des chicanes », Mémoire de master, Tlemcen, 2015.
- [40] A. Zenatti et M. Taleb, « Capteur solaire en présence d'un absorbeur muni d'ailettes longitudinales », Mémoire de master, Ain Temouchent ,2022.

[41] L. Saadallah et B. Hakimi, « Effet des paramètres Géométriques sur les performances Thermiques d'un Capteur solaire muni des ailettes longitudinales », Mémoire de master, Ain Temouchent ,2023.