
Faculté De Technologie
Département de Génie Mécanique

MEMOIRE DE MAGISTER
EN GENIE MECANIQUE
OPTION : DYNAMIQUE DES TRANSFERTS

Thème :

*Etude numérique d'une chaîne énergétique solaire avec
capteur solaire plan à air et stockage thermique pour une
maison solaire*

Présenté Par :
M^{elle} SI CHAIB Amel

Soutenu devant le jury composé de :

| | | | |
|------------------------------|-------------------|---------------------|------------------|
| <i>Mr. HOUMAT Abderrahim</i> | <i>Professeur</i> | <i>UABB Tlemcen</i> | <i>Président</i> |
| <i>Mr. MEFTAH Khouane</i> | <i>MCA</i> | <i>UABB Tlemcen</i> | <i>Examineur</i> |
| <i>Mr. SEBBANE Omar</i> | <i>MCA</i> | <i>UABB Tlemcen</i> | <i>Examineur</i> |
| <i>Mr. ALIANE Khaled</i> | <i>MCA</i> | <i>UABB Tlemcen</i> | <i>Encadreur</i> |

ANNEE UNIVERSITAIRE : 2012-2013

Remerciements

*Tous mes remerciements vont à **Allah** de m'avoir donné le courage, la volonté et la patience de mener à terme ce présent travail, en premier lieu.*

Ce travail à été effectué dans le cadre de l'Université Abou Bekr Belkaid -Tlemcen.

Ce mémoire doit beaucoup aux nombreuses personnes qui m'ont encouragé, soutenu et conforté au long de toutes ces années. Qu'elles trouvent dans ce travail l'expression de mes plus sincères remerciements.

*Je tiens en premier lieu à remercier très chaleureusement mon encadreur, **Dr. ALIANE Khaled**, pour sa disponibilité et son indulgence et ses précieux conseils lucides qu'il a bien voulu me prodiguer en vue de réaliser ce travail, Je n'oublie pas enfin son aide précieuse dans la relecture et la correction de ma thèse.*

*Mes remerciements vont également à **Dr. AZZI Ahmed**, pour m'avoir accordé sa confiance tout au long de cette thèse. Je lui suis reconnaissante de son soutien sans faille et de son optimisme constant quant à l'aboutissement de nos projets.*

*Nous voulons également remercier **Dr. HOUMAT Abderrahim** pour nous avoir fait l'honneur de présider le jury de notre mémoire Nos remerciements vont également aux **Dr. SEBBANE Omar** et **Dr. MEFTAH Khouane** pour s'être intéressé à ce travail et d'avoir bien voulu n'honorer de leur présence dans ce jury.*

Je remercie aussi tous mes amis : Merci pour m'avoir accompagné et aidé pendant ces dernières années.

Je remercie enfin toutes les personnes, qui, de près ou de loin, ont contribué à l'aboutissement de ce travail.

Nomenclature

Lettres latines :

| Symbole | Dénomination | Unités |
|-------------------|---|---------------------------|
| a | Diffusivité thermique | $m^2.s^{-1}$ |
| B | Besoin thermique journaliers | |
| Cp | chaleur massique | $J.kg^{-1}.K^{-1}$ |
| Dr | Déperditions par renouvellement d'air | |
| e | Epaisseur de la veine d'air | m |
| echi | Epaisseur des chicane | m |
| g | Accélération de la pesanteur | $m.s^{-2}$ |
| h | Coefficient de transfert de chaleur par convection | $W.m^{-2}.^{\circ}C^{-1}$ |
| h | La hauteur des chicane | m |
| h _f | Coefficient d'échange entre couverture et air extérieur | $W.m^{-2}.^{\circ}C^{-1}$ |
| H | Hauteur de la section du conduit | m |
| I | Ensoleillement | |
| K | Coefficient d'échange thermique | $W.m^{-2}.^{\circ}C^{-1}$ |
| L | Longueur du domaine | m |
| ℓ | Longueur du domaine | m |
| ṁ | Débit massique | $Kg.s^{-1}$ |
| N | Taux de renouvellement d'air horaire | |
| P | Pression | Pa |
| Q _u | Energie utile | W |
| Q _p | Energie perdue | W |
| Q _s | Energie stockée | W |
| q _v | Débit volumique | $m^3.s^{-1}$ |
| R | Résistance thermique | $m^2.^{\circ}C.W^{-1}$ |
| S | Surface de la paroi | m |
| T _a | Température ambiante | K |
| T _v | Température de vitre | K |
| T _u | Température moyenne du fluide | K |
| Text | Température extérieure | K |
| T _{couv} | Température de couverture | K |
| T _{abs} | Température de l'absorbeur | K |
| T _c | Température du ciel | K |
| T _e | Température d'entrée | K |
| T _s | Température de sortie | K |
| u | Vitesse suivant x | $m.s^{-1}$ |
| v | Vitesse suivant y | $m.s^{-1}$ |
| w | Vitesse suivant z | $m.s^{-1}$ |
| V | Vitesse d'écoulement d'air | $m.s^{-1}$ |
| dV | Volume élémentaire | m^3 |
| V | Volume | m^3 |

Nomenclature

Lettres grecques :

| Symbole | Dénomination | Unités |
|-----------------|-------------------------------------|---------------------------|
| λ | Conductivité thermique du milieu | $w.m^{-1}.\text{°C}^{-1}$ |
| ρ | masse volumique | $Kg.m^{-3}$ |
| μ | viscosité dynamique | PI |
| ν | viscosité cinématique | $m^2.s^{-1}$ |
| ε_a | Emissivité de l'absorbeur | - |
| ε_v | Émissivité de la couverture | - |
| β | Coefficient de dilatation du fluide | K^{-1} |
| α | Coefficient d'absorption | |
| σ | Constante de Stephan | $w.m^{-2}.\text{°K}^{-4}$ |
| ϕ | Flux de chaleur | W |
| ψ | Inclinaison des capteurs | degrés |
| η | Le rendement du capteur | % |

Nombres adimensionnels :

| | | |
|----|--------------------|---|
| Nu | Nombre de Nusselt | $\frac{h.d}{\lambda}$ |
| Ra | Nombre de Rayleigh | $\frac{g.\beta.\Delta T.d^3}{\vartheta^2} . Pr$ |
| Re | Nombre de Reynolds | $\frac{\rho.V.d}{\mu}$ |
| Gr | Nombre de Grashof | $\frac{Ra}{Pr}$ |
| Pr | Nombre de Prandtl | $\frac{Cp.\mu}{\lambda}$ |

Indices :

| | |
|-----|-----------|
| a | Ambiant |
| m | Moyen |
| c | Ciel |
| v | Vitre |
| e | Entrée |
| s | Sortie |
| ext | Extérieur |
| int | Intérieur |
| sup | Supérieur |
| inf | Inférieur |
| i | incident |
| r | réfléchi |
| a | absorbé |
| e | émis |

La liste des figures

Chapitre I :

| | | |
|---------------|---|----|
| Figure I.1 : | Rayonnement solaire du soleil sur terre | 02 |
| Figure I.2 : | Schéma de composition du rayonnement solaire | 02 |
| Figure I.3 : | Schématisation des mouvements de la Terre autour du Soleil | 04 |
| Figure I.4 : | Cycle de vie du soleil | 05 |
| Figure I.5 : | Schéma du rayonnement solaire | 08 |
| Figure I.6 : | Echange de chaleur par conduction | 09 |
| Figure I.7 : | Résistance thermique | 10 |
| Figure I.8 : | Transfert de chaleur par convection | 10 |
| Figure I.9 : | Transfert de chaleur par rayonnement | 14 |
| Figure I.10 : | Réception du rayonnement | 15 |
| Figure I.11 : | Les différents échanges thermiques dans un capteur plan vitré | 15 |
| Figure I.12 : | Pertes thermiques du corps humain et les paramètres dépendant | 17 |
| Figure I.13 : | Différents types des pompes à chaleur géothermiques | 20 |
| Figure I.14 : | Stockage souterrain d'énergie | 20 |
| Figure I.15 : | Les différents éléments de la GTBT | 21 |
| Figure I.16 : | Stock souterrain saisonnier | 23 |
| Figure I.17 : | l'orientation du bâtiment | 24 |
| Figure I.18 : | Schéma de principe du mur capteur | 25 |
| Figure I.19 : | Schéma de principe du mur Trombe | 25 |
| Figure I.20 : | Ensemble des déperditions thermiques d'une maison non isolée | 28 |

Chapitre II :

| | | |
|----------------|---|----|
| Figure II.1 : | Capteur plan à air | 30 |
| Figure II.2 : | Principe de fonctionnement des capteurs solaires non vitrés à revêtement sélectif | 31 |
| Figure II.3 : | Schéma montrant le principe de l'effet de serre | 32 |
| Figure II.4 : | Diverses formes d'absorbeurs (d'après DGS Solar Antalgen | 36 |
| Figure II.5 : | Différentes formes des ailettes ajoutées à l'absorbeur pour améliorer l'efficacité de l'absorbeur (A. Abene et al (2004)) | 36 |
| Figure II.6 : | L'orientation du Capteur solaire plan | 40 |
| Figure II.7 : | Schéma donnant le bilan thermique moyen d'un capteur solaire à air | 41 |
| Figure II.8 : | Schéma représentant le Bilan thermique d'un capteur solaire plan vitré | 41 |
| Figure II.9 : | les pertes thermiques dans un capteur solaire plan | 45 |
| Figure II.10 : | Schéma donnant un exemple numérique sur les échanges d'après D.ROUX | 47 |

La liste des figures

Chapitre III :

| | | |
|-----------------|---|----|
| Figure III.1 : | Volume de contrôle pour la résolution en volume fini. | 53 |
| Figure III.2 : | Schéma unidimensionnel illustrant un volume élémentaire entourant un nœud P | 54 |
| Figure III.3 : | Schéma représentatif de l'algorithme SIMPLE. | 56 |
| Figure III.4 : | Etapes à suivre pour connaître un modèle numérique | 59 |
| Figure III.5 : | Menu de géométrie | 59 |
| Figure III.6 : | Menu de Maillage | 60 |
| Figure III.7 : | Type de Maillage | 61 |
| Figure III.8 : | Le maillage de notre étude | 61 |
| Figure III.9 : | a: Grille obtenue par schéma Pave. b : Grille obtenue un par un schéma Map. | 63 |
| Figure III.10 : | Grille obtenue par un maillage multi-domaine | 63 |
| Figure III.11 : | Grille obtenue par un maillage multi-domaine en utilisant une interface (sur la droite) | 63 |
| Figure III.12 : | Définition des frontières | 64 |
| Figure III.13 : | Exportation du maillage | 64 |
| Figure III.14 : | Importation de la géométrie | 65 |
| Figure III.15 : | Vérification du maillage | 65 |
| Figure III.16 : | Vérification des unités | 66 |
| Figure III.17 : | Choix du solveur | 66 |
| Figure III.18 : | Equation de l'énergie | 67 |
| Figure III.19 : | Choix du modèle de turbulence | 67 |
| Figure III.20 : | Définition des caractéristiques du fluide | 68 |
| Figure III.21 : | Choix de la pression de référence | 68 |
| Figure III.22 : | Valeurs des conditions aux limites | 69 |
| Figure III.23 : | Vitesse d'entrée | 69 |
| Figure III.24 : | Parois inférieure et supérieure | 70 |
| Figure III.25 : | Pression à la sortie | 70 |
| Figure III.26 : | Choix d'ordre des équations et l'algorithme | 71 |
| Figure III.27 : | Initialisation du calcul | 71 |
| Figure III.28 : | Choix des critères de convergence | 72 |
| Figure III.29 : | Choix du nombre des itérations | 72 |
| Figure III.30 : | La convergence de la solution | 73 |
| Figure III.31 : | Schéma représentent les trois phases de la chaine énergétique d'une maison solaire | 73 |
| Figure III.32 : | Présentation Schématique du système | 74 |
| Figure III.33 : | la canalisation du chauffage de la maison solaire | 76 |
| Figure III.34 : | Schéma le stockage souterrain de la maison solaire étudiée par B.Houssine. | 79 |
| Figure III.35 : | Mur Trombe | 80 |
| Figure III.36 : | Capteur modulaire de 2m ² | 82 |
| Figure III.37 : | Schéma d'un absorbeur utilisé par B.Houssine | 83 |

La liste des figures

| | | |
|-----------------|---|----|
| Figure III.38 : | Photos représentant, l'écoulement à l'intérieur d'un capteur à air sans chicane | 84 |
| Figure III.39 : | Les deux configurations de chicanes utilisées | 86 |
| Figure III.40 : | Chicanes en forme triangulaire placées à l'intérieur d'un capteur. | 87 |

Chapitre IV :

| | | |
|----------------|---|-----|
| Figure IV.1 | Schéma représentant quatre types des capteurs solaires plans étudiés | 90 |
| Figure IV.2 : | La géométrie étudiée. | 91 |
| Figure IV.3 : | Influence de maillage sur le profil de vitesse. | 93 |
| Figure IV.4 : | Influence de maillage sur le profil de température. | 93 |
| Figure IV.5: | Comparaison des résultats. | 94 |
| Figure IV.6: | Contours de vitesse. | 95 |
| Figure IV.7 : | Profil de vitesse $x=0.24m$. | 96 |
| Figure IV.8: | Profil de vitesse $y=0.03m$ et $y=1.09m$. | 96 |
| Figure IV.9 : | Contours de Température | 97 |
| Figure IV.10 : | Profil de Température $x=0.24m$. | 97 |
| Figure IV.11 : | Profil de Température $y=0.03m$ et $y=1.09m$. | 98 |
| Figure IV.12 : | Contours de vitesse. | 98 |
| Figure IV.13 : | Profil de vitesse $x=0.24m$. | 99 |
| Figure IV.14 : | Profil de vitesse $y=0.03m$ et $y=1.09m$. | 99 |
| Figure IV.15 : | Contours de Température | 100 |
| Figure IV.16: | Profil de Température $x=0.24m$. | 100 |
| Figure IV.17 : | Profil de Température $y=0.03m$ et $y=1.09m$. | 101 |
| Figure IV.18 : | La géométrie étudiée. | 101 |
| Figure IV.19 : | L'influence de maillage sur le profil de vitesse. | 102 |
| Figure IV.20: | L'influence de maillage sur le profil de Température. | 102 |
| Figure IV.21 : | Validation de la simulation numérique avec les résultats expérimentaux de Bourhaleb Houssine. | 103 |
| Figure IV.22 : | Contours de vitesse pour les quatre Types | 105 |
| Figure IV.23 : | Profils de la vitesse Type N01. | 106 |
| Figure IV.24 : | Profils de la vitesse Type N02. | 106 |
| Figure IV.25 : | Profils de la vitesse Type N03. | 106 |
| Figure IV.26 : | Profils de la vitesse Type N04. | 107 |
| Figure IV.27 : | Contours de Température pour les quatre Types. | 107 |
| Figure IV.28 : | Profils de la Température ($x = 0,12 m$) Type N01. | 108 |
| Figure IV.29: | Profils de la Température ($x = 0,12 m$) Type N02. | 108 |
| Figure IV.30: | Profils de la Température ($x = 0,12 m$) Type N03. | 109 |
| Figure IV.31: | Profils de la Température ($x = 0,12 m$) Type N04. | 109 |
| Figure IV.32: | Contours de vitesse pour les quatre Types. | 111 |
| Figure IV.33: | Profils de la vitesse axiale au milieu $x=0.12m$, pour le Type N01. | 112 |
| Figure IV.34: | Profils de la vitesse axiale au milieu $x=0.12m$, pour le Type N02. | 112 |
| Figure IV.35: | Profils de la vitesse axiale au milieu $x=0.12m$, pour le | 112 |

La liste des figures

| | | |
|-----------------|--|-----|
| Figure IV.36: | Type N03. Profils de la vitesse axiale au milieu $x=0.12m$, pour le Type N04. | 113 |
| Figure IV.37 | Contours de Température pour les quatre Types. | 114 |
| Figure IV.38: | Profils de la température au milieu $x=0.12m$, pour le Type N01 | 115 |
| Figure IV.39 | Profils de la température au milieu $x=0.12m$, pour le Type N02. | 115 |
| Figure IV.40: | Profils de la température au milieu $x=0.12m$, pour le Type N03. | 115 |
| Figure IV.41: | Profils de la température au milieu $x=0.12m$, pour le Type N04. | 116 |
| Figure IV.42: | Disposition des chicanes sous l'absorbeur. | 117 |
| Figure IV.43-a: | La géométrie étudiée | 117 |
| Figure IV.43-b: | Les sections étudiées. | 117 |
| Figure IV.44: | Profils de la vitesse pour les quatre Types. | 119 |
| Figure IV.45: | Profils de la vitesse en amont de la première ailette ($x=0.0125m$), pour le Type N01. | 120 |
| Figure IV.46: | Profils de la vitesse en amont de la première ailette ($x=0.0125m$), pour le Type N02. | 120 |
| Figure IV.47: | Profils de la vitesse en amont de la première ailette ($x=0.0125m$), pour le Type N03. | 120 |
| Figure IV.48: | Profils de la vitesse en amont de la première ailette ($x=0.0125m$), pour le Type N04. | 121 |
| Figure IV.49: | Profils de la vitesse à $x=0.105m$ et $x=0.135m$, pour le Type N01. | 121 |
| Figure IV.50: | Profils de la vitesse à $x=0.105m$ et $x=0.135m$, pour le Type N02. | 122 |
| Figure IV.51: | Profils de la vitesse à $x=0.105m$ et $x=0.135m$, pour le Type N03. | 122 |
| Figure IV.52: | Profils de la vitesse à $x=0.105m$ et $x=0.135m$, pour le Type N04. | 122 |
| Figure IV.53: | Profils de la vitesse à $x=0.2275m$, pour le Type N01. | 123 |
| Figure IV.54: | Profils de la vitesse à $x=0.2275m$, pour le Type N02. | 123 |
| Figure IV.55: | Profils de la vitesse à $x=0.2275m$, pour le Type N03. | 124 |
| Figure IV.56: | Profils de la vitesse à $x=0.2275m$, pour le Type N04. | 124 |
| Figure IV.57: | Le champ de température. | 125 |
| Figure IV.58: | Profils de la température à $x=0.0125m$, pour le Type N01. | 126 |
| Figure IV.59: | Profils de la température à $x=0.0125m$, pour le Type N02 | 126 |
| Figure IV.60: | Profils de la température à $x=0.0125m$, pour le Type N03. | 126 |
| Figure IV.61: | Profils de la température à $x=0.0125m$, pour le Type N04. | 127 |

La liste des figures

| | | |
|-----------------|---|-----|
| Figure IV.62: | Profils de la température à $x=0.105\text{m}$ et $x=0.135\text{m}$, pour le Type N01. | 127 |
| Figure IV.63: | Profils de la température à $x=0.105\text{m}$ et $x=0.135\text{m}$, pour le Type N02. | 127 |
| Figure IV.64: | Profils de la température à $x=0.105\text{m}$ et $x=0.135\text{m}$, pour le Type N03. | 128 |
| Figure IV.65: | Profils de la température à $x=0.105\text{m}$ et $x=0.135\text{m}$, pour le Type N04. | 128 |
| Figure IV.66: | Profils de la température à $x=0.2275\text{m}$, pour le Type N01. | 128 |
| Figure IV.67: | Profils de la température à $x=0.2275\text{m}$, pour le Type N02. | 129 |
| Figure IV.68: | Profils de la température à $x=0.2275\text{m}$, pour le Type N03. | 129 |
| Figure IV.69: | Profils de la température à $x=0.2275\text{m}$, pour le Type N04. | 129 |
| Figure IV.70-a: | La géométrie étudiée. | 130 |
| Figure IV.70-b: | Les sections étudiées. | 130 |
| Figure IV.71: | Le champ de Vitesse. | 132 |
| Figure IV.72: | Profils de la vitesse en amont de la première ailette ($x=0.0125\text{m}$), pour le Type N01. | 133 |
| Figure IV.73: | Profils de la vitesse en amont de la première ailette ($x=0.0125\text{m}$), pour le Type N02. | 133 |
| Figure IV.74: | Profils de la vitesse en amont de la première ailette ($x=0.0125\text{m}$), pour le Type N03. | 134 |
| Figure IV.75: | Profils de la vitesse en amont de la première ailette ($x=0.0125\text{m}$), pour le Type N04. | 134 |
| Figure IV.76: | Profils de la vitesse à $x=0.105\text{m}$ et $x=0.135\text{m}$, pour le Type N01. | 134 |
| Figure IV.77: | Profils de la vitesse à $x=0.105\text{m}$ et $x=0.135\text{m}$, pour le Type N02. | 135 |
| Figure IV.78: | Profils de la vitesse à $x=0.105\text{m}$ et $x=0.135\text{m}$, pour le Type N03. | 135 |
| Figure IV.79: | Profils de la vitesse à $x=0.105\text{m}$ et $x=0.135\text{m}$, pour le Type N04. | 135 |
| Figure IV.80: | Profils de la vitesse à $x=0.2275\text{m}$, pour le Type N01. | 136 |
| Figure IV.81: | Profils de la vitesse à $x=0.2275\text{m}$, pour le Type N02. | 136 |
| Figure IV.82: | Profils de la vitesse à $x=0.2275\text{m}$, pour le Type N03. | 136 |
| Figure IV.83: | Profils de la vitesse à $x=0.2275\text{m}$, pour le Type N04. | 137 |
| Figure IV.84: | Profils de la vitesse, pour le Type N01. | 137 |
| Figure IV.85: | Profils de la vitesse, pour le Type N02. | 137 |
| Figure IV.86: | Profils de la vitesse, pour le Type N03. | 138 |
| Figure IV.87: | Profils de la vitesse, pour le Type N04. | 138 |
| Figure IV.88: | Le champ de température. | 140 |
| Figure IV.89: | Profils de la température à $x=0.0125\text{m}$, pour le Type N01. | 141 |

La liste des figures

| | | |
|----------------|--|-----|
| Figure IV.90: | Profils de la température à $x=0.0125\text{m}$, pour le Type N02 | 141 |
| Figure IV.91: | Profils de la température à $x=0.0125\text{m}$, pour le Type N03. | 141 |
| Figure IV.92: | Profils de la température à $x=0.0125\text{m}$, pour le Type N04. | 142 |
| Figure IV.93: | Profils de la température à $x=0.105\text{m}$ et $x=0.135\text{m}$, pour le Type N01. | 142 |
| Figure IV.94: | Profils de la température à $x=0.105\text{m}$ et $x=0.135\text{m}$, pour le Type N02. | 142 |
| Figure IV.95: | Profils de la température à $x=0.105\text{m}$ et $x=0.135\text{m}$, pour le Type N03. | 143 |
| Figure IV.96: | Profils de la température à $x=0.105\text{m}$ et $x=0.135\text{m}$, pour le Type N04. | 143 |
| Figure IV.97: | Profils de la température à $x=0.2275\text{m}$, pour le Type N01. | 143 |
| Figure IV.98: | Profils de la température à $x=0.2275\text{m}$, pour le Type N02. | 144 |
| Figure IV.99: | Profils de la température à $x=0.2275\text{m}$, pour le Type N03. | 144 |
| Figure IV.100: | Profils de la température à $x=0.2275\text{m}$, pour le Type N04. | 144 |
| Figure IV.101: | Profils de la Température, pour le Type N01. | 145 |
| Figure IV.102: | Profils de la Température, pour le Type N02. | 145 |
| Figure IV.103: | Profils de la Température, pour le Type N03. | 145 |
| Figure IV.104: | Profils de la Température, pour le Type N04. | 146 |

La liste des Tableaux

| | | |
|-----------------|---|-----|
| Tableau I.1 : | Caractéristiques principales du soleil | 03 |
| Tableau I.2: | La comparaison entre le mur capteur et mur Trombe | 26 |
| Tableau II.1 : | Propriétés de quelques surfaces transparentes au rayonnement solaire mais opaques au rayonnement infrarouge | 34 |
| Tableau II.2 : | Caractéristiques thermo-physiques de matériaux métalliques | 35 |
| Tableau II.3 : | Propriétés optiques des revêtements les plus utilisés | 35 |
| Tableau II.4 : | Propriétés thermiques de quelques matériaux isolants | 38 |
| Tableau II.5 : | Valeur du coefficient K | 46 |
| Tableau III.1 : | Schéma de génération des cellules | 62 |
| Tableau III.2 : | Besoins mensuels de l'habitation (B.Houssine) | 77 |
| Tableau III.3 : | Caractéristiques thermiques des parois et déperditions | 78 |
| Tableau III.4 : | Les résultats expérimentaux du Bourhaleb.H | 84 |
| Tableau III.5 : | les résultats du 2 ^{ème} expérience de Bourhaleb.H | 85 |
| Tableau III.6 : | les résultats obtenus par Bourhaleb.H dans le cas des capteurs avec chicane rectangulaires | 87 |
| Tableau IV.1 : | Les propriétés thermo-physiques des matériaux qui composent la paroi | 92 |
| Tableau IV.2 : | Les conditions aux limites du 1 ^{ère} cas des capteurs sans chicanes. | 104 |
| Tableau IV.3 : | Les conditions aux limites du 2 ^{ème} cas des capteurs sans chicanes. | 110 |
| Tableau IV.4 : | Les conditions aux limites des capteurs avec chicanes rectangulaires. | 118 |
| Tableau IV.5: | Les conditions aux limites des capteurs avec chicanes triangulaires. | 131 |

Résumé :

Les capteurs solaires (thermiques) sont des dispositifs chargés de l'interception de l'énergie solaire et de la piéger, par l'effet de serre. Pour pouvoir l'utiliser par la suite de l'analyse des travaux des chercheurs dans ce domaine, à travers leurs publications (théoriques et expérimentales, anciennes et récentes), nous avons synthétisé et développé une méthodologie qui permet l'étude des capteurs solaires plans et en particulier ceux utilisant l'air comme fluide caloporteur. Par souci d'exactitude et d'approfondissement, tous les éléments qui permettent de définir des modèles de connaissance des capteurs plans, ont été rapportés avec tous les détails nécessaires à leur intégrations dans les processus tels que : modélisation, simulation complète,...

Des modèles de connaissance de trois types de capteurs ont été traités en profondeur (sans chicane et avec chicane : rectangulaire et triangulaire), afin de mettre en évidence toutes les subtilités liées à l'interaction de la physique, des mathématiques et de l'informatique. Il est certain que de la bonne adéquation de ces trois éléments découlera une modélisation dont la divergence par rapport la réalité est faible.

La même étude que nous avons faite pour le stockage thermique de chaleur. Dans le même but, et pour de besoins d'utiliser la chaleur a des périodes ou l'irradiation solaire est faible, voir même nulles, une étude du stockage thermique est nécessaire dans ce contexte le stockage par mur Trombe sera étudié.

L'examen des résultats, relatifs aux capteurs étudiés, a révélé que le transfert de l'énergie entre l'absorbeur et le fluide caloporteur (dans notre cas de l'air) a besoin d'être travaillé dans les capteurs sans chicanes; ce qui a conduit à envisager le type de capteur avec chicanes (rectangulaires et triangulaires) dont l'absorbeur est doté de chicanes. L'introduction des chicanes contribue au transfert de l'énergie, par convection, de l'absorbeur vers le fluide caloporteur (pour remédier à la mauvaise conduction de l'air) et améliore le régime d'écoulement interne à l'insolateur.

Le comparatif, de tous les paramètres et caractéristiques des capteurs, laisse voir que la conception des capteurs avec chicanes, offre les meilleures performances. Cela suggère qu'il serait opportun d'en développer des versions en vu d'une éventuelle amélioration.

Mots clefs : *Capteur solaire, Énergie solaire, Thermique, obstacles, Absorbeur, Rayonnement, Mur Trombe, Stockage thermique, Écoulement, Simulations numériques.*

Abstract:

The solar panels (thermal) are devices in charge of the interception of solar energy and to trap it, by the greenhouse effect. To be able to use it there after analysis of work of the researchers in this field, through their publications (theoretical and experimental, old and recent), we synthesized and developed a methodology which allows the study of the plane solar panels and in particular those using the air like coolant. By preoccupation of exactitude and a deepening, all the elements which make it possible to define models of knowledge of the plane sensors, were brought back with all the details necessary to their integrations in the processes such as: modeling, complete simulation,...

Models of knowledge of three types of sensors were treated in-depth (without baffle and with baffle: rectangular and triangular), in order to highlight all subtleties related to the interaction of physics, mathematics and data processing. It is certain that good adequacy of these three elements will rise a modeling whose divergence by report reality is low. The same study that we made for the thermal storage of heat. With a same aim, and for needs to use heat has periods or the solar irradiation is weak, to see even worthless, a study of thermal storage is necessary in this context storage by wall Waterspout will be studied.

The examination of the results, relating to the studied sensors, revealed that the transfer of the energy between the absorber and coolant (in our case of the air) needs to be worked in the sensors without baffles; what resulted in considering the type of sensor with baffles (rectangular and triangular) whose absorber is equipped with baffles. The introduction of the baffles contributes to the transfer of the energy, by convection, from the absorber towards coolant (to cure the bad conduction of the air) and improves the internal mode of flow to the solar furnace.

The comparative one, of all the parameters and characteristic of the sensors, lets see that the design of the sensors with baffles, offers the best performances. That suggests that it would be convenient to develop of them versions in seen of a possible improvement.

Key words: Solar panel, Solar energy, Thermics, Air, obstacles, Absorber, Radiation, Mur Trombe, thermal Storage, Flow, Transfers, Digital simulations.

ملخص:

تعتبر اللواقط الشمسية (الحرارية) الأجهزة المسؤولة عن اعتراض الطاقة الشمسية و فح ظاهرة الاحتباس الحراري . من خلال تحليل منشورات أعمال الباحثين في هذا المجال (النظرية و التجريبية، القديمة والجديدة)، لقد قمنا بتأليف و تطوير منهجية لدراسة اللواقط الشمسية المسطحة و خاصة تلك التي تستخدم الهواء كمبرد. بعد القيام بدراسة معمقة لجميع العناصر التي تسمح بتعريف نماذج اللواقط المسطحة، وضعنا مقرر مع التفاصيل اللازمة لإدماجهم في العمليات التالية: النمذجة، والمحاكاة الكاملة... وقد نوقشت نماذج لمعرفة ثلاثة أنواع اللواقط المعالجة بعمق (بدون حواجز و بحواجز : مستطيلة و مثلثية) لتسليط الضوء على التعقيدات المتعلقة بتأثير الفيزياء، الرياضيات و الإعلام الآلي. فمن المؤكد أن تتلاءم بشكل جيد باتباع نموذج معارض بالنسبة للحقيقة منخفض.

نفس الدراسة التي قمنا بها لتخزين الطاقة الحرارية. و يحتاج إلى استخدام فترات الحرارة أو الإشعاع الشمسي منخفضة، أو حتى معدومة ، دراسة التخزين الحراري هو ضروري في هذا السياق، قمنا بدراسة تخزين بواسطة جدار ترومب.

استعراض نتائج اللواقط التي قمنا بدراستها، أظهرت أن نقل الطاقة بين الماص السائل التبريد (في هذه الحالة الهواء) يحتاج إلى أن يعمل في اللواقط بدون حواجز مما أدى إلى النظر في نوع اللواقط بالحواجز (مستطيلة و مثلثة)، و التي يتم توفيرها الماص بوجود الحواجز.

مقدمة الحواجز تساهم في نقل الطاقة بين ظاهرة الحمل الحراري، من الماص نحو سائل التبريد (لمعالجة سوء الحمل الحراري للهواء) و تحسين نظام التدفق الداخلي.

المقارنة بين جميع معالم وخصائص اللواقط، نرى أن تصميم اللواقط بحواجز، يوفر أفضل مردود، و هو يشير بأنه مناسب لتطوير الإصدار بهدف إيمكانه التحسين.

كلمات البحث: اللاقط الشمسي، الطاقة الشمسية، الحرارة، الهواء، الحواجز، الماص، الإشعاع، جدار ترومب، تخزين الحرارة، التدفق ، التحويلات، المحاكاة العددية...

| | |
|--|--------------|
| Introduction générale | i-ii-iii |
| Chapitre I : Généralités sur l'énergie solaire. | 01-28 |
| I.1 Généralités sur l'énergie solaire. | 01 |
| Introduction. | 01 |
| I.1.1 Le soleil. | 01 |
| I.1.1.1 Principes physiques : la lumière. | 02 |
| I.1.1.2 Les caractéristiques du soleil. | 03 |
| I.1.1.3 La déclinaison. | 03 |
| I.1.1.4 Evolution. | 04 |
| I.1.2 L'énergie solaire. | 05 |
| I.1.2.1 Origine. | 05 |
| I.1.2.1.1 Les avantages et inconvénients de l'énergie solaire. | 05 |
| I.1.2.2 Captation. | 06 |
| I.1.3 Les composantes d'un système de conversion thermique. | 07 |
| I.1.4 Le rayonnement solaire. | 07 |
| I.2 Le transfert thermique de la chaleur. | 08 |
| I.2.1 Conduction. | 08 |
| I.2.1.1 Loi de Fourier. | 09 |
| I.2.1.2 Résistance thermique. | 09 |
| I.2.1.3 Equation générale de la chaleur. | 10 |
| I.2.2 Convection. | 10 |
| I.2.2.1 Nombres sans dimension. | 11 |
| I.2.2.1.1 Nombre de Prandtl. | 11 |
| I.2.2.1.2 Nombre de Nusselt. | 11 |
| I.2.2.1.3 Nombre de Grashof. | 11 |
| I.2.2.1.4 Nombre de Rayleigh. | 11 |
| I.2.2.1.5 Nombre de Reynolds. | 12 |
| I.2.2.2 Flux de chaleur en convection forcée. | 12 |
| I.2.2.3 Le flux de chaleur en convection naturelle. | 12 |
| I.2.3 Transfert de chaleur par rayonnement. | 13 |
| I.2.3.1 L'émissance (totale). | 13 |
| I.2.3.2 Le corps noir. | 13 |
| I.2.3.3 Loi du rayonnement thermique. | 13 |
| I.2.3.3.1 Loi de Planck : (émissance monochromatique du corps noir). | 13 |
| I.2.3.3.2 Loi de Stefan Boltzmann. | 14 |
| I.2.3.4 Transfert par rayonnement entre surface. | 14 |
| I.2.3.5 Réception du rayonnement par un solide. | 15 |
| I.2.4 Les différents modes de transferts thermiques dans un capteur solaire. | 15 |
| I.3 Le stockage thermique de la chaleur. | 16 |
| Introduction. | 16 |
| I.3.1 Le confort thermique. | 17 |
| I.3.1.1 Définition du confort thermique. | 18 |

Sommaire

| | |
|---|--------------|
| I.3.1.2 Paramètres du confort thermique. | 18 |
| I.3.1.2.1 Température de l'air ambiant. | 18 |
| I.3.1.2.2 Température des parois. | 18 |
| I.3.1.2.3 Température résultante. | 18 |
| I.3.1.2.4 Homogénéité des températures d'un local. | 19 |
| I.3.1.2.5 Vitesse de circulation de l'air. | 19 |
| I.3.2 Eléments de conception bioclimatique. | 19 |
| I.3.2.1 Le stockage géothermique. | 19 |
| I.3.2.1.1 Le fonctionnement des systèmes Géothermique à Très Basse Température. | 21 |
| a) Eléments de la GTBT et schéma de principe. | 21 |
| b) Types d'utilisation de l'énergie. | 21 |
| c) Modes de fonctionnement des installations de GTBT. | 22 |
| I.3.3 Le stockage Murs capteurs, Murs Trombe. | 23 |
| I.3.3.1 Principe du mur capteur. | 24 |
| I.3.3.2 Principe du mur trombe. | 25 |
| I.3.3.3 Comparaison. | 26 |
| I.3.4 Isolation thermique. | 26 |
| I.3.5 Les déperditions thermiques d'une maison. | 28 |
| Conclusion. | 28 |
| Chapitre II : Etude théorique d'un capteur solaire plan a air. | 30-68 |
| Introduction. | 30 |
| II.1 Description d'un capteur solaire plan à Air. | 30 |
| II.1.1 Définition d'un capteur solaire plan à Air. | 30 |
| II.1.2 Principe de fonctionnement. | 31 |
| II.1.2.1 L'effet de serre. | 31 |
| II.1.3 Les principaux éléments du capteur solaire plan à air. | 32 |
| II.1.4 Le rôle de chaque composante. | 33 |
| II.1.4.1 La couverture transparente. | 33 |
| II.1.4.2 L'absorbeur. | 35 |
| II.1.4.3 Veine d'air. | 37 |
| II.1.4.4 Veine d'air mobile. | 37 |
| II.1.4.5 Le fluide caloporteur. | 37 |
| II.1.4.6 L'isolant thermique. | 38 |
| II.1.4.7 Le coffre. | 38 |
| II.1.5 Principaux paramètres caractérisant un capteur. | 39 |
| II.1.5.1 Le rendement. | 39 |
| II.1.5.2 La superficie. | 39 |
| II.1.5.3 La stagnation. | 39 |
| II.1.5.4 Orientation et inclinaison des capteurs solaires. | 39 |
| II.2 Etude des capteurs fonctionnant à basse température. | 40 |
| II.2.1 Etude théorique. | 40 |
| II.2.1.1 Mécanisme des pertes. | 40 |

Sommaire

| | |
|--|--------------|
| II.2.1.2 Equation linéaire simplifiée. | 40 |
| II.2.1.3 Bilan de fonctionnement. | 41 |
| II.2.2 Modèle mathématique traduisant le fonctionnement d'un capteur. | 45 |
| II.2.2.1 Puissance dissipée. | 45 |
| II.2.2.2 Puissance récupérée par un capteur plan. | 46 |
| II.2.2.3 Performance d'un capteur. | 46 |
| Conclusion. | 47 |
| Chapitre III : Modélisation mathématique et présentation du code Fluent. | 49-88 |
| Introduction. | 49 |
| III.1 Le système d'équation. | 50 |
| III.1.1 Conservation de la masse. | 50 |
| III.1.2 Conservation de la quantité de mouvement. | 50 |
| III.1.2.1 Conservation de la quantité de mouvement suivant la direction axiale. | 50 |
| III.1.2.2 Conservation de la quantité de mouvement suivant la direction radiale. | 50 |
| III.1.3 Conservation d'énergie. | 51 |
| III.1.3.1 Conservation d'énergie dans le fluide. | 51 |
| III.1.3.2 Conservation d'énergie dans la paroi. | 51 |
| III.1.4 Modèle de turbulence $k - \varepsilon$. | 51 |
| III.1.5 Energie cinétique turbulente k . | 51 |
| III.1.6 Energie de dissipation ε . | 51 |
| III.2 Présentation des les méthodes classiques d'analyse numérique. | 52 |
| III.2.1 Méthodes des différences finies. | 52 |
| III.2.2 Méthodes des éléments finis. | 52 |
| III.2.3 Méthodes des volumes finis. | 52 |
| III.2.4 Méthode de résolution des équations de transport. | 52 |
| III.2.4.1 Schéma de discrétisation. | 52 |
| III.2.4.2 Choix de la méthode de couplage Pression-Vitesse. | 55 |
| III.2.4.2.1 Algorithme SIMPLE. | 55 |
| III.2.5 Résolution numérique. | 57 |
| III.2.5.1 Paramètre de contrôle de la convergence. | 57 |
| III.2.5.1.1 Critère de convergence. | 57 |
| III.2.5.1.2 Sous-relaxation. | 58 |
| III.2.6 Étapes de résolution du problème. | 58 |
| III.3 Présentation du code Fluent. | 58 |
| III.3.1 Définition. | 58 |
| III.3.2 Maillage sous Gambit. | 59 |
| III.3.2.1 Menu géométrie. | 59 |
| III.3.2.2 Menu mesh (maillage). | 60 |

Sommaire

| | |
|---|---------------|
| III.3.2.3 Choix du type de maillage. | 60 |
| III.3.2.4 Maillage s'une surface. | 62 |
| III.3.2.5 Maillage multi-domaine. | 63 |
| III.3.2.6 Maillage par interfaces. | 63 |
| III.3.2.7 Définition des frontières. | 64 |
| III.3.2.8 Exportation du maillage. | 64 |
| III.4 Présentation de Fluent. | 65 |
| III.4.1 Importation de la géométrie. | 65 |
| III.4.2 Vérification du maillage importé. | 65 |
| III.4.3 Vérification de l'échelle. | 66 |
| III.4.4 Choix du solveur. | 66 |
| III.4.5 L'équation de l'énergie. | 67 |
| III.4.6 Choix du modèle de turbulence. | 67 |
| III.4.7 Définition des caractéristiques du fluide. | 68 |
| III.4.8 Operating conditions. | 68 |
| III.4.9 Conditions aux limites. | 69 |
| III.4.10 Choix d'ordre des équations et l'algorithme. | 71 |
| III.4.11 Initialisation. | 71 |
| III.4.12 Choix des critères de convergence. | 72 |
| III.4.13 Lancement du calcul. | 72 |
| III.5 Présentation des problématiques. | 73 |
| III.5.1 Stockage thermique. | 74 |
| III.5.1.1 Stockage sous terrain. | 74 |
| III.5.1.2 Mur Trombe. | 80 |
| III.5.1.2.1 Schéma de principe du mur Trombe. | 80 |
| III.5.2 Captation. | 81 |
| III.5.2.1 Expérience du « Bourhaleb.Houssine». | 81 |
| III.5.2.1.1 Capteurs sans chicanes. | 81 |
| III.5.2.1.2 Capteurs avec chicanes. | 86 |
| A) Configuration N°01 (chicanes rectangulaires). | 86 |
| B) Configuration N°02 (chicanes triangulaires). | 87 |
| Conclusion. | 88 |
| Chapitre IV : Résultats et Discussion. | 90-138 |
| Introduction. | 90 |
| IV.1 Etude de stockage mur Trombe. | 91 |
| IV.1.1 Description de la géométrie. | 91 |
| IV.1.2 Influence de maillage. | 93 |
| IV.1.2.1 Profil de vitesse. | 93 |
| IV.1.2.2 Profil de Température. | 93 |
| IV.1.3 Validation des résultats. | 93 |
| IV.1.4 Discussion. | 94 |
| IV.1.4.1 Mur Trombe sans flux. | 94 |
| IV.1.4.1.1 Les conditions aux limites. | 94 |

Sommaire

| | |
|---|-----|
| IV.1.4.1.2 Champ de vitesse. | 95 |
| IV.1.4.1.3 Profils de vitesse. | 95 |
| IV.1.4.1.4 Champs de température. | 97 |
| IV.1.4.1.5 Profils température. | 97 |
| IV.1.4.2 Mur Trombe avec flux. | 98 |
| IV.1.4.2.1 Les conditions aux limites. | 98 |
| IV.1.4.2.2 Champ de vitesse. | 98 |
| IV.1.4.2.3 Profils de vitesse. | 99 |
| IV.1.4.2.4 Champs de température. | 100 |
| IV.1.4.2.5 Profils de température. | 100 |
| IV.2 Etude de l'écoulement dans le capteur. | 101 |
| IV.2. 1 Etude de l'écoulement dans le capteur sans chicanes. | 101 |
| IV.2. 1.1 Description de la géométrie. | 101 |
| IV.2.1.2 Influence de maillage. | 102 |
| IV.2.1.2.1 Profil de vitesse. | 102 |
| IV.2.1.2.2 Profil de Température. | 102 |
| IV.2.1.3 Validation des résultats. | 103 |
| IV.2.1.4 Discussion. | 103 |
| IV.2.1.4.1 La 1ere Cas (Un seul vitrage). | 104 |
| IV.2.1.4.1.1 Les conditions aux limites. | 104 |
| IV.2.1.4.1.2 Champ de vitesse. | 104 |
| IV.2.1.4.1.3 Profils de vitesse. | 105 |
| IV.2.1.4.1.4 Champs de Température. | 107 |
| IV.2.1.4.1.5 Profils de Température. | 108 |
| IV.2.1.4.2 La 2ème Cas (Double vitrage). | 110 |
| IV.2.1.4.2.1 Les conditions aux limites. | 110 |
| IV.2.1.4.2.2 Champ de vitesse. | 110 |
| IV.2.1.4.2.3 Profils de vitesse. | 111 |
| IV.2.1.4.2.4 Champ de température. | 114 |
| IV.2.1.4.2.5 Profils de température. | 114 |
| IV.2.2 Etude de l'écoulement dans des capteurs solaires avec chicanes rectangulaires. | 116 |
| IV. 2.2 1 Description de la géométrie. | 117 |
| IV2.2 2 Les conditions aux limites. | 118 |
| IV. 2.2 3 Discussion. | 118 |
| IV. 2.2.3.1 Champ de vitesse. | 118 |
| IV.2.2.3.2 Profil de vitesse. | 119 |
| IV.2.2.3.3 Champ de Température. | 125 |
| IV.2.2.3.4 Profil de Température. | 125 |
| IV.2.3 Etude de l'écoulement dans des capteurs solaires avec chicanes triangulaires. | 130 |
| IV.2.3.1 Description de la géométrie. | 130 |
| IV.2.3.2 Les conditions aux limites. | 131 |

Sommaire

| | |
|-----------------------------------|-----|
| IV.2.3.3 Discussion. | 131 |
| IV.2.3.3.1 Champ de vitesse. | 131 |
| IV.2.3.3.2 Profil de vitesse. | 133 |
| IV.2.3.3.3 Champ de Température. | 139 |
| IV.2.3.3.4 Profil de Température. | 140 |
| Conclusion générale. | 149 |
| Références bibliographiques. | 152 |

Introduction Générale

L'utilisation par l'homme des sources d'énergie renouvelable, dont l'énergie solaire, éolienne et hydraulique, est très ancienne ; ce type d'énergie est utilisé depuis l'antiquité et son utilisation a continué à exister jusqu'à l'arrivée de la « Révolution Industrielle », époque à laquelle, étant donné le bas prix du pétrole, elles ont été abandonnées.

Cependant depuis ces dernières années étant donné l'accroissement du coût des combustibles fossiles et des problèmes environnementaux dérivés de leur exploitation, nous assistons à un à renouveau des énergies renouvelables.

Les énergies renouvelables sont inépuisables, propres et peuvent être utilisés de manière autogérée (puisqu'elles peuvent être utilisées dans le même lieu où elles sont produites). Elles présentent en outre l'avantage additionnel de se compléter entre elles. Par exemple, l'énergie solaire photovoltaïque fournit de l'électricité les jours dégagés (généralement avec peu de vent), tandis que dans les jours froids et venteux, avec des nuages, ce sont les aérogénérateurs qui prendront le relais et produiront la majorité de l'énergie électrique.

L'utilisation de l'énergie solaire fait appel à plusieurs mécanismes de transformation suivant le principe de la chaîne énergétique :

- **Le captage**, dispositif qui permet à récupérer l'énergie de la source sous une forme exploitable ;
- **La transformation**, permet de produire le type d'énergie attendue (électricité, chaleur, ...). Cette étape n'est pas réalisée dans le cas d'une utilisation directe de l'énergie captée (pompes à chaleur, moulins à vent mécaniques) ;
- **Le transport**, qui achemine l'énergie de la source à l'usage, le dispositif de production n'étant pas toujours situé à proximité ;
- **Le stockage**, qui permet de compenser les fluctuations de la production, car l'énergie produite n'est pas disponible à la demande.

On se retourne donc vers les consommateurs d'énergie. Un des gros consommateurs, identifié depuis les années 70 est le secteur bâtiment. Ce constat a engendré un développement considérable de la recherche en énergétique afin de tendre vers une conception optimale du bâtiment. Les axes de recherche s'étendent de l'enveloppe (isolation, matériaux, vitrages...) jusqu'aux différents types d'installations techniques en incluant des systèmes de régulation et de gestion technique.

Introduction Générale

L'un des obstacles majeurs qui entrave actuellement le développement de la conversion thermo-solaire est l'insuffisante connaissance du fonctionnement des divers types de stockage de celle-ci et en particulier les stockages en mur Trombe.

Les écoulements autour des objets est un phénomène qui se produit fréquemment dans la pratique. Ils sont indispensables dans la conception mécanique et thermique de nombreux systèmes en engineering comme : avions, automobiles, bâtiments, composant électroniques, les aubes de turbines. Dans notre étude on utilise les obstacles (chicanes) au sein de la veine d'air du capteur solaire pour promouvoir la turbulence et par la suite intensifié le transfert de chaleur entre l'absorbeur et le fluide caloporteur.

L'identification et l'étude des phénomènes hydro et aérodynamiques qui surgissent dans le sillage d'un obstacle restent un sujet d'intérêt d'actualité dans ces domaines.

Donc, le sillage autour des obstacles est d'un intérêt important dans la pratique. En effet la connaissance des structures turbulentes générées derrière ces obstacles et leurs différents régimes est d'une utilité primordiale dans la conception des ouvrages (capteur) exposés aux écoulements de fluides. Le choix de l'étude des obstacles cylindrique et carré résulte de leurs simplicités géométriques permettant d'avoir des facilités expérimentales et numériques

Beaucoup de travaux de recherches ont été réalisés pour modeler l'écoulement autour des obstacles. Pour cela, plusieurs expériences dans le domaine ont été réalisées et confrontées aux méthodes numériques. Pour cette dernière une large gamme de méthodes mathématiques ont été développées afin de s'approcher de la réalité de l'écoulement et de fournir le maximum d'information qui peuvent se produire.

Pour notre cas, on a utilisé le code Fluent, qui représente un outil de simulation numérique (CFD) fort de grande qualité afin de simuler un écoulement autour de deux obstacles différents. Ce code de calcul trouve de plus en plus de place dans différents domaines d'industrie surtout pour les écoulements de fluide et le transfert de chaleur.

Plan de thèse :

Ce travail est divisé en quatre chapitres :

Le premier chapitre présente une généralité sur l'énergie solaire, quelques notions sur le transfert et le stockage thermique de la chaleur.

Le deuxième chapitre comporte une étude théorique du capteur solaire plan à air.

Le troisième chapitre est consacré à la modélisation mathématique, en présentant le problème physique de la convection naturelle turbulente stationnaire au sein de la veine fluide du capteur.

Les équations de conservation de masse, de quantité de mouvement, de l'énergie turbulent k et de dissipation ε sont présentés. Nous avons présenté par la suite la procédure de résolution numérique, basée sur le code de calcul FLUENT. La géométrie et le maillage sont générés par le préprocesseur : GAMBIT.

L'algorithme SIMPLE est utilisé pour la résolution séquentielle des systèmes d'équations.

Le dernier chapitre comporte la simulation et l'interprétation des résultats numériques obtenus dans les configurations étudiées. On présente les validations avec les travaux de la bibliographie. Une étude comparative entre deux formes de chicanes a été abordée dans ce chapitre, à savoir une forme rectangulaire et une autre triangulaire. Le problème de stockage thermique par le mur Trombe est traité en deuxième lieu.

Finalement, ce mémoire sera terminé par une conclusion générale qui résume les principaux résultats obtenus, ainsi que des perspectives futures basées sur ce travail qui sont donc envisageables.



Chapitre I

***Généralités sur
l'énergie solaire***

I.1 Généralités sur l'énergie solaire :

Introduction :

Les sources d'énergie jouent un rôle très important dans le développement de l'humanité, avec l'évolution industrielle et technologique de notre siècle.

La demande énergétique est croissante chaque année, pour cette raison il faut chercher sur une autre source d'énergie nouvelle plus précisément les énergies renouvelables et notamment l'énergie solaire [1].

L'énergie solaire est présentée par deux systèmes :

- Systèmes solaire thermique (chaleur):
 - Les capteurs solaires thermiques.
- Système solaire photovoltaïque (électricité):
 - Panneaux ou modules photovoltaïques.

Nous allons nous intéresser à l'exploitation de l'énergie solaire par voie thermique en utilisant un capteur solaire plan à air.

Un des problèmes essentiels de l'utilisation de l'énergie solaire est les faibles échanges thermiques réalisés avec l'air dans la veine dynamique du capteur solaire. Ces échanges ne permettent pas d'obtenir de meilleures performances ou une meilleure efficacité thermique de ses systèmes. Par contre, l'introduction de chicanes (obstacles) disposées en rangées dans les conduits de ces systèmes améliore nettement les transferts thermiques [2].

I.1.1 Le soleil :

Le soleil est un énorme réacteur thermonucléaire, où l'hydrogène fusionne en hélium. L'énergie qu'il envoie dans toutes les directions est à la fois énorme (environ 10 000 fois les besoins terrestres), mais malheureusement assez diluée, puisque la puissance maximale reçue à l'extérieur de l'atmosphère sur une surface d'un mètre carré perpendiculaire à la direction du rayonnement est au maximum d'environ 1350 W (cette valeur est légèrement supérieure en hiver car la distance Terre-Soleil est minimale à ce moment-là). Pour récupérer une quantité d'énergie importante, il faut donc nécessairement augmenter la surface qui intercepte le flux solaire. Concentrer le rayonnement solaire n'augmente pas la puissance ou l'énergie récupérés, mais seulement le niveau de température pouvant être atteint [3], la figure I.1 représente le rayonnement solaire du soleil sur terre.

Chapitre I : Généralités sur l'énergie solaire.

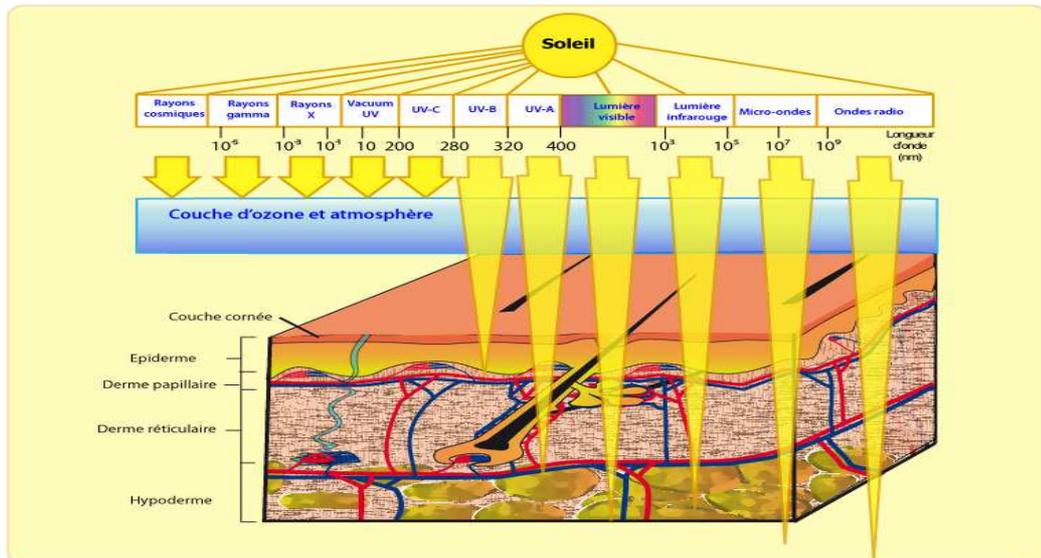


Figure I.1 : Rayonnement solaire du soleil sur terre [3].

I.1.1.1 Principes physiques : la lumière [4]

Le soleil émet des rayonnements principalement dans la partie «visible» du spectre (lumière, entre 400 et 700 nm). Plus la longueur d'onde du rayonnement est courte, plus la quantité d'énergie portée par les photons est grande (la figure I.2).

Cette énergie peut se transmettre sous forme de chaleur : l'énergie va exciter les atomes composant la matière, qui vont s'agiter et s'échauffer.

Exposés aux rayons du soleil, les capteurs vont convertir l'énergie des photons, soit en énergie thermique, soit en énergie électrique.

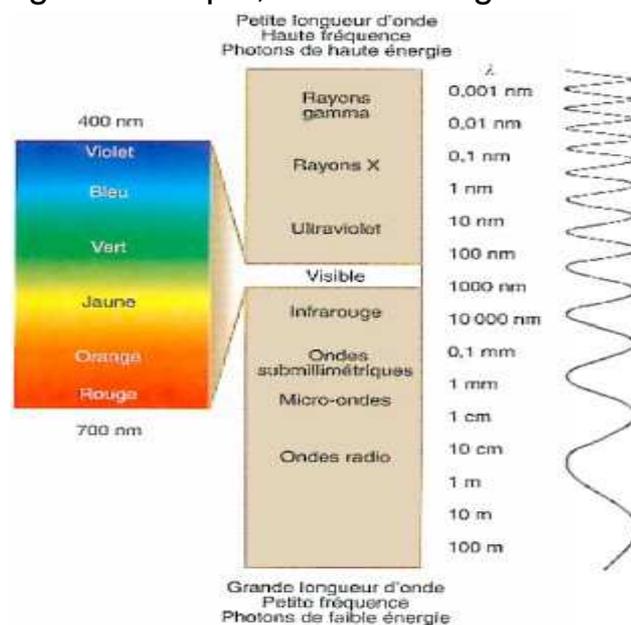


Figure I.2 : Schéma de composition du rayonnement solaire [4].

I.1.1.2 Les caractéristiques du soleil :

Le soleil est une étoile qui se compose de 73,46 % d'hydrogène, de 24,85 % d'hélium et d'une fraction d'éléments plus lourds. Bien que le soleil soit une étoile de taille moyenne, il représente à lui seul plus de 99 % de la masse du système solaire. Sa forme est presque parfaitement sphérique, avec un aplatissement aux pôles estimé à neuf milliardièmes. Les principales caractéristiques du soleil sont regroupées dans le tableau I.1. [5]

Tableau I.1 : « Caractéristiques principales du soleil ».

| Caractéristiques | | Valeur |
|----------------------------|--------------|---------------------------------------|
| Masse | | $1,9891 \times 10^{30}$ kg |
| Diamètre | | 1 392 000 km |
| Masse volumique moyenne | | 1 408 kg/m ³ |
| Surface | | $6,09 \times 10^{12}$ km ² |
| Volume | | $1,41 \times 10^{18}$ km ³ |
| Magnitude absolue | | 4,83 |
| Magnitude apparente | | -26,8 |
| Puissance rayonnée | | $3,83 \times 10^{26}$ w |
| Période galactique | | $2,26 \times 10^8$ années |
| Demi grand axe de la Terre | | 149 597 870 km |
| Vitesse | | 217 km/s ¹ |
| Gravité à la surface | | 273,95 m/s ² |
| Température | Au centre | 15,1 Millions K |
| | A la surface | 5770K |

I.1.1.3 La déclinaison :

L'axe de rotation de la terre est incliné par rapport au plan de l'écliptique (plan dans lequel la terre se déplace autour du soleil).

La déclinaison est un angle qui permet de prendre en compte cette situation pour calculer la trajectoire apparente du soleil dans le ciel. Elle varie entre (23 ° 27 ') au solstice d'été à (- 23 ° 27 ') au solstice d'hiver, de manière sinusoïdale.

Les mouvements de la Terre autour de son axe et autour du Soleil sont schématisés sur la figure I.3. [6]

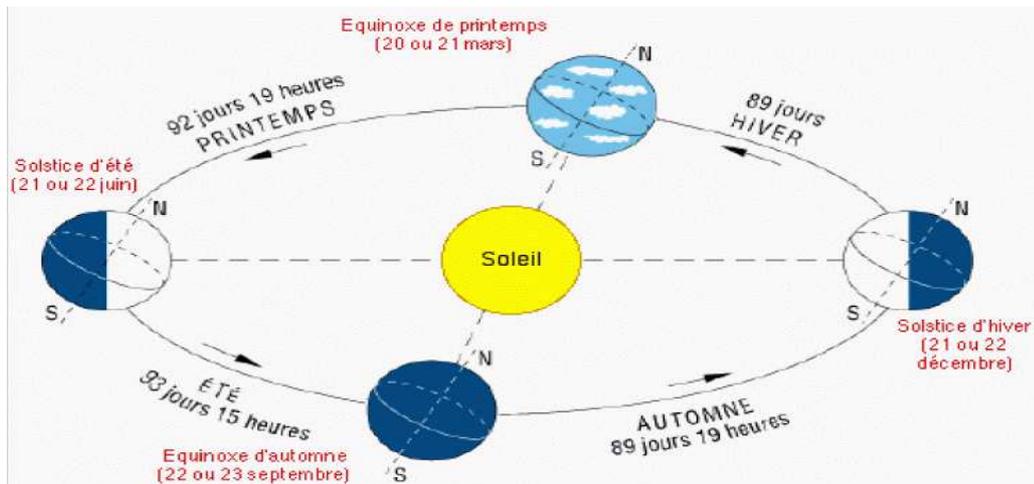


Figure I.3 : Schématisation des mouvements de la Terre autour du Soleil [7].

I.1.1.4 Evolution :

Pendant les cinquante premiers millions d'années de son existence, le soleil s'est contracté jusqu'à atteindre approximativement sa taille actuelle. L'énergie gravitationnelle libérée par ce mouvement a chauffé l'intérieur de l'astre et, lorsque le noyau s'est révélé suffisamment chaud, la contraction a cessé pour laisser place à la réaction de fusion thermonucléaire.

La durée de vie du soleil dépend de la quantité d'hydrogène qui reste à consommer, on estime qu'il existe depuis environ 4.5 milliards d'années, et subsistera, tel qu'il est, pendant au moins encore 5 milliards d'années [8].

Lorsque le soleil aura épuisé ses réserves d'hydrogène, il changera de structure. Sa surface externe s'étendra au-delà de l'orbite actuelle de la terre ou il se transformera en une géante rouge, légèrement plus froide en surface qu'actuellement, mais 10 000 fois plus brillante en raison de sa taille gigantesque. Le soleil demeurera une géante rouge, brûlant l'hélium dans son noyau, pendant un demi-milliard d'années seulement, après ce stade, le noyau résiduel du soleil s'effondrera pour former une étoile naine blanche petite de la taille de la terre environ, il se refroidira alors lentement pendant plusieurs milliards d'années.

La figure I.4 donne le cycle de vie du soleil.

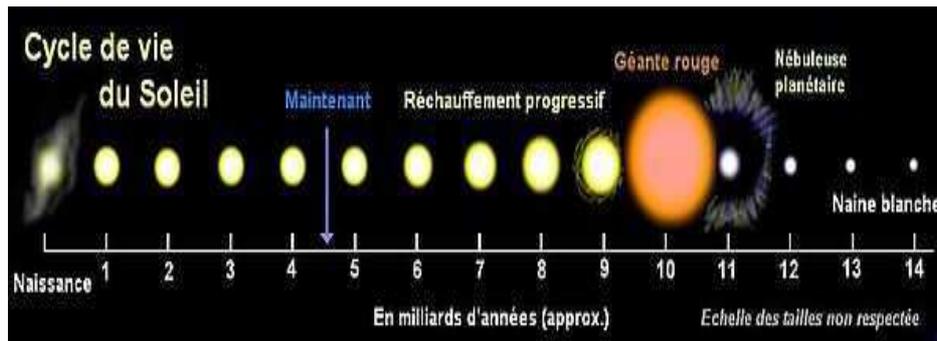


Figure I.4 : Cycle de vie du soleil [8].

I.1.2 L'énergie solaire :

L'énergie solaire est l'énergie que dégage le soleil sous forme de rayonnement, direct ou diffus. Sur terre l'énergie solaire est à l'origine du cycle de l'eau et du vent, le règne végétal dont dépend le règne animal, l'utilise également en la transformant en énergie chimique par la photosynthèse. Grâce aux diverses exécutions, elle peut être transformée en une autre forme d'énergie utile pour l'activité humaine, notamment en chaleur, en électricité ou en biomasse. Par extension, l'expression « énergie solaire » est souvent employée pour désigner l'électricité ou l'énergie thermique obtenue à partir du rayonnement solaire [9].

I.1.2.1 Origine :

Les conditions résidantes au cœur du soleil favorisent l'interaction des différents atomes d'hydrogène qui subissent une réaction de fusion thermonucléaire. Le résultat de ce processus, lorsqu'il se répète est la fusion de quatre noyaux d'hydrogène en un noyau d'hélium avec émission d'énergie sous forme de rayonnements gamma et X.

Chaque seconde, 564 millions de tonnes d'hydrogène se transforment en 560 millions de tonnes d'hélium, cette différence de 4 millions de tonnes par seconde correspond à la différence d'énergie de liaison entre les protons d'hydrogène et ceux d'hélium donnant une énergie sous forme de rayonnement, estimée à $3.7 \cdot 10^{26}$ j/s. [8]

I.1.2.1.1 Les avantages et inconvénients de l'énergie solaire [10]:

- **Les avantages :**
 - L'énergie solaire est inépuisable et non polluante.
 - L'énergie est propre et ne dégage pas de gaz à effet de serre.
 - L'énergie solaire thermique permet d'assurer une partie des besoins en eau chaude sanitaire et en chauffage.

- L'installation des panneaux solaires thermiques permet de réaliser des économies conséquentes.

- Les frais de maintenance et de fonctionnement d'une installation thermique sont relativement faibles.

• **Les inconvénients :**

- Le coût d'investissement d'une installation solaire thermique est relativement élevé.

- L'énergie solaire est une énergie intermittente. Il faut donc un système de chauffage d'appoint.

- La production d'énergie solaire n'est possible que lorsqu'il y a du soleil.

- Il faut pouvoir stocker la chaleur dans des ballons des dalles chauffantes.

- Les panneaux solaires contiennent des déchets toxiques : cuivre et chrome.

I.1.2.2 Captation :

Il existe différentes techniques pour capter une partie de cette énergie à savoir [8]:

• **L'énergie solaire thermique :**

Le thermique solaire est un procédé de transformation de l'énergie solaire en une forme thermique, qu'on peut utiliser :

✚ En usage direct de la chaleur : chauffe-eau solaire, chauffage solaire, cuisinière et séchoir solaire.

✚ En usage indirect où la chaleur sert pour un autre usage : centrales solaires thermodynamiques, froid solaire.

• **L'énergie solaire thermodynamique :**

L'énergie solaire thermodynamique utilise le solaire thermique pour produire de l'électricité selon le même principe qu'une centrale électrique classique mais en utilisant des centrales héliothermoélectriques [11].

Trois types principaux de centrales sont utilisés [12]:

✚ Les centrales à capteurs cylindro-paraboliques pour atteindre des températures entre 300 et 350 °C.

✚ Les centrales à capteurs paraboliques pour atteindre des températures de 1000°C ou plus.

✚ Les centrales à tour pour atteindre 1000 °C.

- **L'énergie solaire photovoltaïque :**

Elle permet de produire de l'électricité produite par transformation d'une partie du rayonnement solaire avec une cellule photovoltaïque [12].

Les photopiles utilisent l'effet photovoltaïque, elles sont formées d'une couche d'un matériau semi-conducteur et d'une jonction semi-conductrice. Le silicium est le plus employé ; cependant, l'arséniure de gallium offre des meilleures performances, mais reste beaucoup plus onéreux.

I.1.3 Les composantes d'un système de conversion thermique :

Tout système de conversion de l'énergie solaire doit comprendre les éléments suivants :

- Une surface de captation du rayonnement solaire.
- Un circuit caloporteur qui assure le transfert de l'énergie extraite du capteur à l'élément d'accumulation (stockage des calories), les fluides utilisés généralement comme fluide caloporteur sont : l'eau et l'air.
- Un stockage thermique.
- Un réseau de distribution [4].

I.1.4 Le rayonnement solaire :

L'énergie solaire qui arrive sur terre est disponible sous forme de rayonnement électromagnétique émis depuis le soleil. La puissance transmise par ce rayonnement varie avec la longueur d'onde du rayonnement. La plus grosse quantité d'énergie est apportée par les longueurs d'onde visibles (lumière blanche qui est la superposition de toutes les couleurs) [3].

Certaines longueurs d'onde sont absorbées partiellement ou totalement par les particules de l'atmosphère (les molécules d'ozone absorbent une partie des ultras violets).

Il en résulte que la puissance disponible sur un mètre carré normal au rayonnement est de l'ordre de 1000 W par temps ensoleillé alors qu'elle est de l'ordre de 1350 W hors atmosphère [4] (la figure I.5).

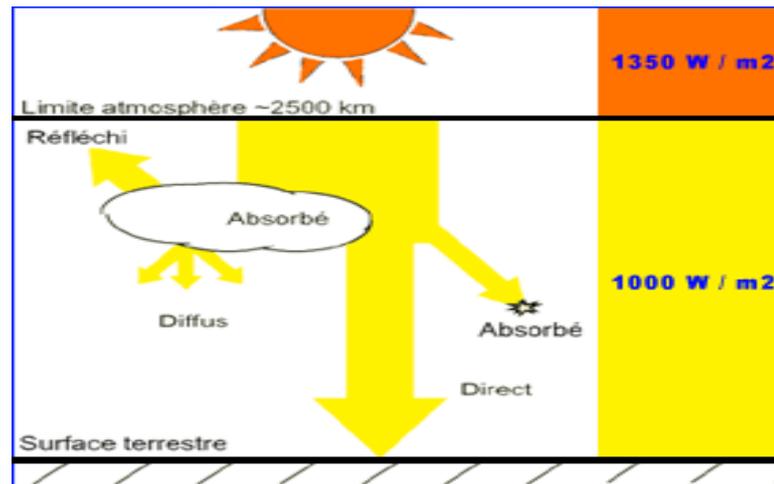


Figure I.5: Schéma du rayonnement solaire [3].

I.2 Le transfert thermique de la chaleur :

Introduction :

Les Transferts thermiques forment une discipline qui étudie la propagation de la chaleur. Le transfert de chaleur est en fait un échange de calories, toujours d'un milieu chaud à un milieu froid.

Il existe trois modes de transfert de chaleur [13]:

1. La conduction ;
2. La convection ;
3. Le rayonnement.

- **Conduction:** transfert de chaleur survenant dans un médium stationnaire sous l'effet d'un gradient de température (fluide ou solide);
- **Convection:** transfert de chaleur survenant dans un fluide en mouvement sous l'effet d'un gradient de température.
- **Rayonnement:** transfert de chaleur induit par l'échange d'ondes électromagnétiques entre un corps émetteur et un corps récepteur.

I.2.1 Conduction :

C'est un mode de transfert de chaleur au sein d'un milieu solide, sans déplacement de matière, sous l'influence d'une différence de température. La propagation de la chaleur par conduction à l'intérieur d'un corps s'effectue selon deux mécanismes distincts [13]:

- Une transmission par les vibrations des atomes ou molécules ;
- Une transmission par les électrons libres.

La figure I.6 montre l'échange de chaleur par conduction.

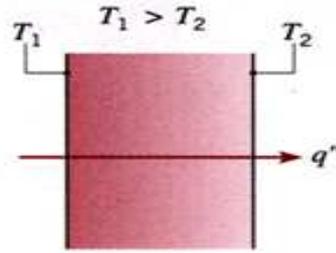


Figure I.6 : Echange de chaleur par conduction [13].

La théorie de la conduction repose sur l'hypothèse de Fourier :

I.2.1.1 Loi de Fourier :

Il existe une relation linéaire entre la densité de flux thermique et le gradient de température. En tout point d'un milieu isotrope, la densité de flux thermique instantanée est proportionnelle à la conductivité thermique λ du milieu, et au gradient de température [14].

$$\Phi = -\lambda \cdot \text{grad}(T) \quad (I.1)$$

Ou sous la forme suivante :

$$\Phi = -\lambda \cdot s \frac{\delta T}{\delta x} \quad (I.2)$$

Avec :

Φ : Flux de chaleur transmis par conduction (w).

λ : Conductivité thermique du milieu (w/m.°C).

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

s : Aire de la section de passage du flux de chaleur (m²)

Pour un milieu isotrope, la conductivité thermique λ est une grandeur scalaire positive, caractéristique du milieu, fonction en général de T . pour un milieu isotrope et homogène λ ne dépend pas de T . dans de nombreux cas pratiques, lorsque les écarts de température ne sont pas trop élevés, on peut considérer, avec une précision suffisante, λ comme une constante pour un milieu donné.

I.2.1.2 Résistance thermique :

Considérant l'intersection d'un tube de courant par deux surfaces isothermes de températures T_1 et T_2 , on définit la résistance thermique par la relation [13]:

$$T_1 - T_2 = R \cdot \Phi \quad (I.3)$$

On reconnaît dans cette équation la forme générale de la loi d'Ohm :

$$E_1 - E_2 = R \cdot I \quad (I.4)$$

Dans laquelle les potentiels E sont remplacés par les températures et l'intensité I par le flux Φ .

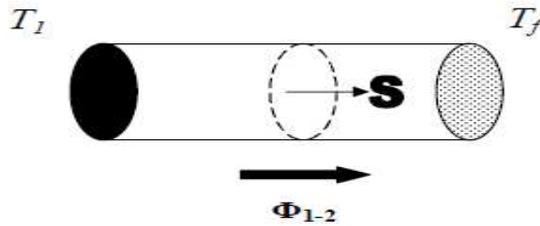


Figure I.7: Résistance thermique [13].

I.2.1.3 Equation générale de la chaleur :

Cette équation qui exprime la conservation d'énergie d'un élément infinitésimal de matière s'écrit [14]:

$$\overrightarrow{div}(\lambda \cdot \overrightarrow{grad}T) + P = \rho \cdot C_p (\partial T / \partial t) \quad (I.5)$$

Où :

P : représente la production de chaleur en w/m^3

Cp: chaleur massique en (J/kg.K),

ρ : masse volumique en (kg/m^3).

I.2.2 Convection :

C'est le transfert de chaleur entre un solide et un fluide, l'énergie étant transmise par déplacement du fluide. Ce mécanisme de transfert est régi par la loi de Newton [13,14].

$$\Phi = h \cdot S \cdot (T_p - T_\infty) \quad (I.6)$$

Avec :

Φ : Flux de chaleur transmis par convection (w)

h : Coefficient de transfert de chaleur par convection ($W/m^2 \text{ } ^\circ C$)

Tp : Température de surface du solide ($^\circ C$)

T_∞ : Température du fluide loin de la surface du solide ($^\circ C$)

S : Aire de la surface de contact solide/fluide (m^2)

La valeur du coefficient de transfert de chaleur par convection **h** est en fonction de la nature du fluide, de sa température, de sa vitesse et des caractéristiques géométriques de la surface de contact solide/fluide (La figure I.8).

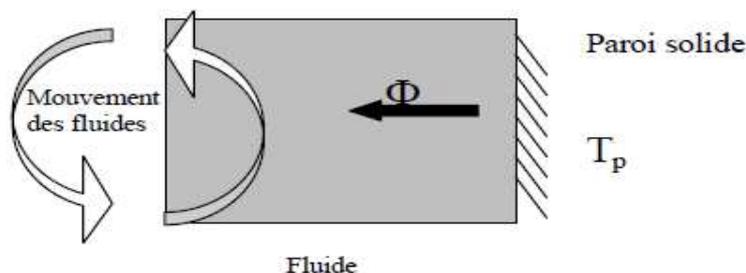


Figure I.8 : Transfert de chaleur par convection [13].

I.2.2.1 Nombres sans dimension :

Nous définirons ci-dessous les nombres sans dimension rencontrés en transfert thermique par convection [14]:

I.2.2.1.1 Nombre de Prandtl :

$$Pr = \frac{\mu \cdot C_p}{\lambda} = \frac{\nu}{a} \quad (1.7)$$

Avec :

λ : Conductivité thermique du milieu (w/m°C).

μ : viscosité dynamique en (PI).

C_p : chaleur massique en (J/kg.K).

Ce nombre représente le rapport de la diffusivité mécanique ν à la diffusivité thermique a .

Un fluide peu visqueux mais bon conducteur thermique, aura un Pr très faible et vice-versa.

I.2.2.1.2 Nombre de Nusselt :

$$Nu = \frac{h \cdot L}{\lambda_f} \quad (1.8)$$

Avec

L : dimension caractéristique (m)

Ce nombre exprime le rapport entre le flux de chaleur par convection dans le fluide et le flux par conduction, λ_f ici la conductivité du fluide. Contrairement au Pr , Nu dépend non seulement de la nature du fluide à travers λ_f , mais aussi de la géométrie de l'écoulement à travers la dimension caractéristique L et de champ de la vitesse dans la couche limite à travers sa dépendance sur h . Tout comme pour h , on définit un nombre de Nusselt moyen Nu et un nombre de Nusselt local.

$$Nu_l = \frac{h_l \cdot L}{\lambda_l} \quad (1.9)$$

I.2.2.1.3 Nombre de Grashof :

$$Gr = \frac{\beta \cdot g \cdot \rho^2 \cdot L^3 \cdot (T - T_f)}{\mu^2} \quad (1.10)$$

Ce nombre exprime le rapport entre les forces de gravité multipliées par les forces d'inertie et le carré des forces de viscosité.

I.2.2.1.4 Nombre de Rayleigh :

Il s'écrit sous la forme suivante :

$$Ra = Pr \cdot Gr = \frac{\beta \cdot g \cdot L^3 \cdot (T - T_f)}{a \cdot \nu} \quad (1.11)$$

Où il caractérise l'écoulement en convection naturelle.

Avec :

β : coefficient de dilatation du fluide (K^{-1}).

L : dimension caractéristique de la surface d'échange (m).

g : accélération de la pesanteur (m/s^2)

μ : viscosité dynamique du fluide (kg/m.s)

ν : viscosité cinématique (m^2/s)

ρ : masse volumique en (kg/m^3)

α : Diffusivité thermique en (m^2/s)

I.2.2.1.5 Nombre de Reynolds :

Est de la forme de :

$$Re = \frac{\rho \cdot u \cdot L}{\mu} = \frac{u \cdot L}{\nu} \quad (I.12)$$

Ce nombre exprime le rapport des forces d'inertie sur les forces de viscosité.

I.2.2.2 Flux de chaleur en convection forcée :

L'application de l'analyse dimensionnelle montre que la relation liant le flux de chaleur transféré par convection aux variables dont il dépend peut être recherchée sous la forme d'une relation entre trois nombres adimensionnels [13]:

$$Nu = f(Re, Pr) \quad (I.13)$$

Avec :

Nu : nombre de Nusselt, **Re** : nombre de Reynolds et **Pr** : nombre de Prandtl

Le calcul d'un flux de chaleur transmis par convection forcée s'effectue donc de la manière suivante :

1. Calcul des nombres adimensionnels de Reynolds et de Prandtl ;
2. Suivant la valeur de **Re** et la configuration → choix de la corrélation ;
3. Calcul de **Nu** par application de cette corrélation ;
4. Calcul de **h** (Coefficient de transfert de chaleur).

$$h = \lambda \cdot Nu \text{ Et de } \Phi = h \cdot S \cdot (T_p - T) \quad (I.14)$$

I.2.2.3 Le flux de chaleur en convection naturelle :

L'application de l'analyse dimensionnelle montre que la relation liant le flux de chaleur transféré par convection aux variables dont il dépend peut être recherchée sous la forme d'une relation entre trois nombres adimensionnels :

$$Nu = f(Gr, Pr) \quad (I.15)$$

Avec :

Nu : nombre de Nusselt, **Pr** : nombre de Prandtl et **Gr** : nombre de Grashof.

Le flux de chaleur transmise par convection naturelle s'effectue donc de la manière suivante:

1. Calcul des nombres adimensionnels de Grashof et de Prandtl ;
2. Suivant la valeur de **Gr** et la configuration → choix de la corrélation ;
3. Calcul de **Nu** par application de cette corrélation ;
4. Calcul de **h** (Coefficient de transfert de chaleur)

$$h = \lambda Nu/D \text{ et de } \Phi = h S (T_p - T) \quad (I.16)$$

I.2.3 Transfert de chaleur par rayonnement :

Contrairement aux deux autres modes d'échange qui sont la conduction et la convection, le rayonnement ne nécessite pas l'existence d'un support matériel. Il se propage dans l'espace, comme dans tout type de milieu. Si ce milieu est homogène, il se propage en ligne droite.

Le rayonnement c'est un transfert d'énergie électromagnétique entre deux surfaces (même dans l'espace) [15].

I.2.3.1 L'émittance (totale) :

C'est le flux total émis par unité de surface de la source. On considère globalement la puissance $d\Phi$ émise par un élément de surface dS dans l'ensemble des directions où il peut rayonner (hémisphère limitée par le plan tangent à dS en son centre), et on divise ce flux par l'aire de dS . L'émittance est notée par **M**. Son unité est le w/m² :

$$M = d\Phi/dS \quad (I.17)$$

I.2.3.2 Le corps noir :

C'est un corps idéal vis-à-vis du rayonnement qui, par définition, absorbe tout le rayonnement qu'il reçoit quelque soit la fréquence et la direction. A l'équilibre thermique, il émet autant de rayonnement qu'il en absorbe de sorte qu'un corps noir rayonne le maximum d'énergie de façon uniforme dans toutes les directions.

I.2.3.3 Loi du rayonnement thermique :

I.2.3.3.1 Loi de Planck : (émittance monochromatique du corps noir)

L'émittance monochromatique d'un corps noir $M_{\lambda,T}^\circ$ à la longueur d'onde λ et la température **T**, est donnée par la loi de Planck [16]:

$$M_{\lambda,T}^\circ = \frac{c_1 \lambda^{-5}}{\exp\left(\frac{c_2}{\lambda T}\right) - 1} \quad (I.18)$$

Où :

$M_{\lambda,T}^{\circ}$: est le flux énergétique émis par la surface dans tout l'hémisphère et ramène à l'unité de longueur d'onde λ , la surface étant à la température T. $M_{\lambda,T}^{\circ}$ est exprimé en w/m^3 ou, dans le cas où λ est exprimé en microns (μm), $M_{\lambda,T}^{\circ}$ sera en $w/(m^2 \cdot \mu m)$.

Les constantes c_1, c_2 sont égales à :

$$c_1 = 3,74.108 w \cdot \mu m^4 / m^2$$

$$c_2 = 1,44.104 \mu m^{\circ} k$$

I.2.3.3.2 Loi de Stefan Boltzmann :

Cette loi fournit l'émittance totale du rayonnement du corps noir dans l'espace en fonction de sa température absolue (sur tout le spectre de longueur d'onde). Elle s'écrit :

$$M^{\circ} = \sigma \cdot T^4 \quad (w/m^2) \quad (I.19)$$

Avec

σ : est la constante de Stefan Boltzmann

$$\sigma = 5,67.10^{-8} (w/(m^2 \cdot k^4)).$$

I.2.3.4 Transfert par rayonnement entre surface [14]:

1) petit objet convexe placé dans une enceinte large ($S_1 \ll S_2$)

$$\Phi = \sigma \cdot \epsilon_p \cdot S \cdot (T_p^4 - T_{\infty}^4) \quad \text{Exprimé en (W)} \quad (I.20)$$

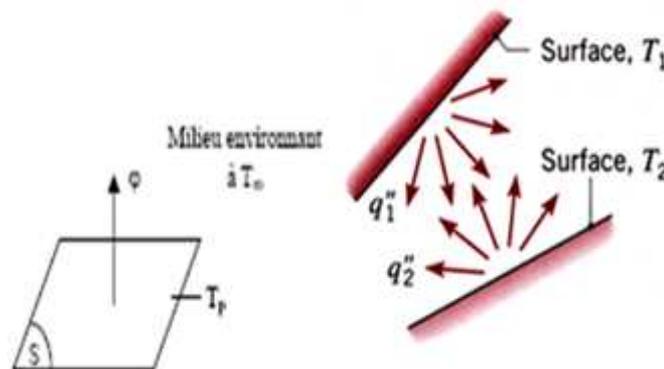


Figure I.9 : Transfert de chaleur par rayonnement [13].

2) Deux plans parallèles infinis :

$$\Phi = \frac{\sigma \cdot (T_1^4 - T_2^4)}{\frac{1}{\epsilon_1} + \frac{1}{\epsilon_2} - 1} \quad (I.21)$$

Avec :

Φ : Flux de chaleur transmis par rayonnement exprimé en (W).

σ : Constante de Stephan ($5,67.10^{-8} (w/(m^2 \cdot k^4))$).

ϵ_p : Facteur d'émission de la surface.

T_p : Température de la surface en (K).

T_{∞} : Température du milieu environnant la surface en (K).

S : Aire de la surface en m^2 .

I.2.3.5 Réception du rayonnement par un solide :

Quand un rayon d'énergie incident Φ_i frappe un corps à la température T , une partie $\Phi_r \cdot \rho$ de l'énergie incidente est réfléctée par la surface S , une autre partie $\Phi_a \cdot \alpha$ est absorbée par le corps qui s'échauffe et le $\Phi_t \cdot \tau$ transmis et continue son chemin [13], la figure I.10 montre la réception du rayonnement par un corps solide:

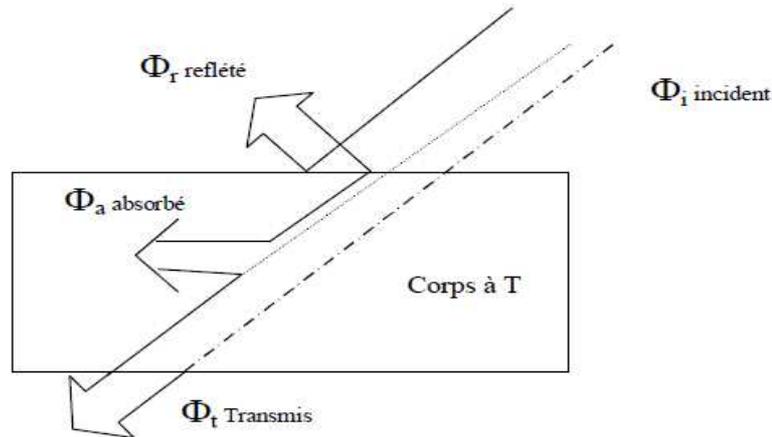


Figure I.10 : Réception du rayonnement [15].

On a évidemment : $\Phi_i = \Phi_r \cdot \rho + \Phi_a \cdot \alpha + \Phi_t \cdot \tau$ (I.22)

D'où : $\rho + \alpha + \tau = 1$.

I.2.4 Les différents modes de transferts thermiques dans un capteur solaire :

Un capteur solaire met en jeu simultanément les trois modes de transfert thermique, conduction, convection et rayonnement (figure I.11) [4].

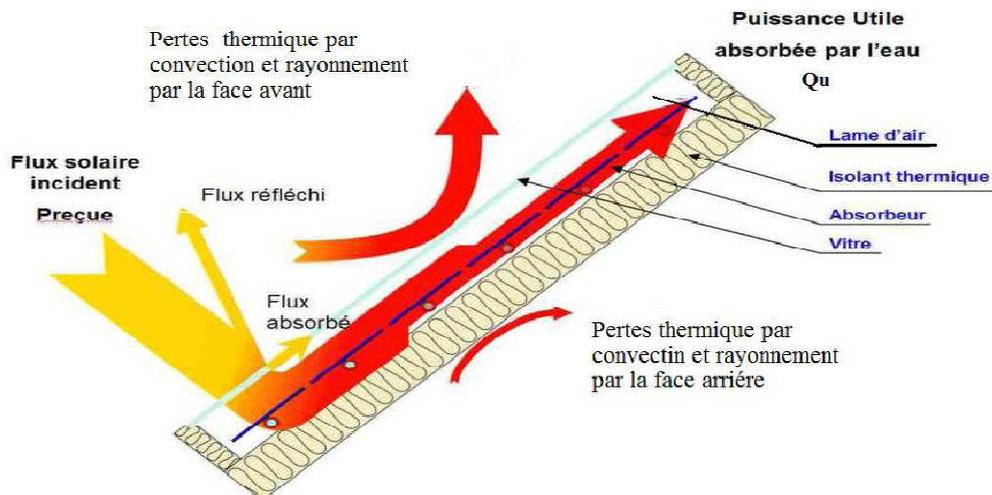


Figure I.11 : Les différents échanges thermiques dans un capteur plan vitré [14].

I.3 Le stockage thermique de la chaleur :

Introduction :

Le stockage est un moyen privilégié pour une gestion optimale de l'énergie thermique. Il permet en effet d'adapter la production aux besoins et de créer les conditions les plus favorables à cette gestion en réalisant une relation constante entre l'énergie demandée et l'énergie fournie. De plus, dans le bâtiment, il peut contribuer efficacement à améliorer le confort des occupants quand il est installé dans l'enveloppe (inertie des murs, dalles ...).

Parmi les applications usuelles on peut citer [15]:

- La gestion de l'énergie thermique produite dans les installations industrielles.

On réalise des systèmes qui récupèrent la chaleur perdue pendant la durée de fonctionnement de l'installation pour l'utiliser au moment et à l'endroit où on en a besoin.

- La gestion de l'électricité produite pendant les heures creuses.

L'énergie électrique produite pendant les heures creuses peut être transformée en énergie thermique pour alimenter les bâtiments ou les installations industrielles pendant les heures de pointes où le besoin d'énergie peut dépasser les capacités de production des centrales.

- La gestion de l'énergie frigorifique.

Le stockage de l'énergie et en particulier le stockage par la chaleur latente permet une réelle gestion de l'énergie frigorifique en fonction des besoins. En effet, en froid industriel et en climatisation, le procédé de production ne permet pas de grands écarts de la température d'exploitation, c'est ce qui rend quasi-impossible l'utilisation d'un stockage par chaleur sensible. L'énergie disponible est utilisée pour charger un stockage et l'énergie stockée sera utilisée dans les installations lors de pointes de consommation, quand la puissance appelée est supérieure à la puissance de la centrale comme dans le cas de la gestion de l'énergie électrique.

- Les systèmes solaires passifs :

Parmi les problèmes pratiques qui concernent les systèmes à énergie solaire, c'est le besoin d'un moyen efficace, avec lequel on peut stocker la chaleur pendant un jour ensoleillé pour l'utiliser pendant la nuit ou dans une autre période.

- Le refroidissement des circuits électroniques :

Le fonctionnement en transitoire des circuits électroniques nécessite généralement des puissances de refroidissement bien supérieures aux puissances nominales qui conduisent à surdimensionner les circuits, leurs alimentations et leur système de refroidissement.

L'utilisation d'un stockage d'énergie associé à ces circuits permet de faire face aux appels transitoires de puissance sans ce surdimensionnement.

- La gestion du confort thermique dans les bâtiments :

Le confort thermique est fonction non seulement de la température et de l'humidité de l'air ambiant mais encore des températures des parois. C'est une des raisons pour laquelle dans ce cas le stockage par chaleur latente est attractif.

Il y a deux techniques principales de Stockage Thermique :

Le stockage par la chaleur sensible (Stockage Thermique Sensible, STS) dans lequel la température des matériaux de stockage varie avec la quantité d'énergie stockée.

Le stockage par la chaleur latente (Stockage Thermique Latente, STL) qui utilise l'énergie emmagasinée ou restituée lorsqu'un corps change d'état (solide, liquide, gaz).

I.3.1 Le confort thermique :

Dans les milieux bâtis, le confort thermique constitue une exigence essentielle à laquelle le concepteur doit apporter les réponses nécessaires. L'environnement thermique est caractérisé par quatre grandeurs physiques (la température de l'air, l'intensité de rayonnement solaire, l'humidité et la vitesse de l'air). Ces variables réagissent avec l'activité et la vêtue du corps humain pour établir son état thermique et constituent ensemble les six paramètres de base des échanges thermiques entre l'homme et son environnement [17], (la figure I.12).



Figure I.12 : Pertes thermiques du corps humain et les paramètres dépendant [18].

I.3.1.1 Définition du confort thermique :

La définition du confort thermique est très complexe en raison de l'interaction de plusieurs variables environnementales et personnelles. Le maintien de l'équilibre thermique entre le corps humain et son environnement est l'une des principales exigences pour la santé, le bien-être et le confort [18]. Les conditions dans lesquelles on obtient cet équilibre est l'état du corps lorsqu'il atteint l'équilibre avec son environnement, dépendant de la conjugaison de nombreux facteurs. Certains de ces facteurs sont d'ordre personnel (l'activité physique, le niveau d'habillement, etc.) et d'autres sont des facteurs de l'environnement tels que la température de l'air, le rayonnement solaire, l'humidité relative et le mouvement de l'air.

Le confort thermique a été défini comme l'état satisfaction vis-à-vis de l'environnement thermique établi par échange thermique entre le corps et son environnement [17]. Le confort thermique dépend de contexte et des caractéristiques individuelles. Il conçu comme un processus adaptatif dynamique qui intègre les différents mécanismes physiques, physiologiques et psychologiques [19].

I.3.1.2 Paramètres du confort thermique :

C'est la sensation de bien être physique résultant de l'équilibre thermique du corps. Or le corps échange de la chaleur avec son environnement par convection, rayonnement et évaporation [17].

I.3.1.2.1 Température de l'air ambiant :

Hiver: la réglementation datant de 1973 fixe comme température de confort 19 °C au centre du local à 1.5 m de hauteur.

Été: en climat tempéré $\theta \leq 27$ à 28 °C. Ces températures peuvent être modulées en fonction de l'affectation du local et de l'heure de la journée [19].

I.3.1.2.2 Température des parois :

L'écart avec la température ambiante doit rester inférieur à 2 à 3 °C. Plus la paroi est froide, plus elle absorbe de rayonnement. Pour solutionner, on utilise par exemple des rideaux, des parois opaques isolées, des corps de chauffe en alliage ou bien des parois à doubles vitrages [18].

I.3.1.2.3 Température résultante :

Si pendant le temps t en seconde, le corps de surface S (les vêtements) échange avec son environnement une quantité de chaleur Q en joule (j), le flux de chaleur échangé est en Φ w et

$$\phi = \frac{Q}{t} \quad (1.23)$$

Si T_a est la température de l'air du milieu environnant, T_p des vêtements, on montre que le flux échangé simultanément par convection avec l'air ambiant et par rayonnement avec les parois environnantes, est

proportionnel avec les surfaces des vêtements (ou du corps) et à l'écart entre la température des vêtements et la température résultante externe T_r qui dépend à la fois de T_a et de T_p [18].

$$\dot{Q} = h \cdot (T - T_r) \quad T_r \approx 0.49T_a + 0.51T_p \quad (1.24)$$

h : est le coefficient global d'échange.

T_r : appelée aussi température résultante de confort est souvent approchée à la moyenne arithmétique de T_a et T_p .

$$T_r \approx \frac{T_a + T_p}{2} \quad (1.25)$$

I.3.1.2.4 Homogénéité des températures d'un local :

Horizontalement: 2 à 3 °C maximum d'écart toléré d'un point à un autre.

Verticalement: écart maximum de 3 °C entre la tête et les chevilles.

I.3.1.2.5 Vitesse de circulation de l'air :

Elle doit rester comprise entre environ 0.1 et 0.2 m/s (ne jamais dépasser 0.5, m/s), car l'échange thermique augmente si la vitesse de l'air augmente. Les objectifs de l'installation de chauffage ou de climatisation d'un local sont de réaliser le confort thermique des occupants de ce local quel que soient les conditions climatiques extérieures, tout en respectant des impératifs d'économie d'énergie [19].

I.3.2 Eléments de conception bioclimatique :

La conception bioclimatique s'est beaucoup développée depuis les années 70, et a donné lieu à de nombreuses recherches qui ont permis de produire des outils de conception bioclimatiques, aussi bien pour les architectes, les bureaux d'étude, que les ingénieurs. Un rappel de l'état de l'art sur la modélisation et la conception est effectué selon deux axes: le solaire passif et la ventilation naturelle. En effet, un composant solaire se doit de compléter une architecture éventuellement bioclimatique, et non pas concurrencer celle-ci au risque de faire diminuer sensiblement l'efficacité de l'une des ces deux techniques. Par exemple, on peut imaginer que l'intégration d'un capteur à air peut s'avérer inutile pour un bâtiment bioclimatique s'il y a une mauvaise adéquation entre les besoins de chauffage et la production du capteur à air [20].

I.3.2.1 Le stockage géothermique :

Les systèmes géothermiques sont des technologies clés pour la fourniture et l'équilibre entre l'offre et la demande d'énergie dans les villes intelligentes [21]:

A) L'énergie géothermique : est une source d'énergie renouvelable qui peut fournir de la chaleur et/ou de l'électricité à tout moment et n'importe où. La géothermie est une technologie adaptée pour produire de l'électricité avec un facteur de charge très élevée (> 80%), contribuant à équilibrer le réseau électrique lorsqu'elle est combinée avec les

technologies intermittentes (dépendantes des conditions climatiques). Le secteur de la géothermie est convaincue de pouvoir contribuer aux réseaux d'électricité intelligents, mais également à la production de chaleur et/ou de froid par l'utilisation de pompes à chaleur géothermiques notamment.

B) Par ailleurs, dans les villes intelligentes, le réseau électrique se combine avec les réseaux de chaud et/ou de froid: ici aussi, la géothermie est une bonne solution en fournissant à la fois le chauffage et le refroidissement ; c'est également une technologie permettant le stockage, en particulier avec le stockage thermique souterrain (à la fois en basse et haute températures et à faible ou grande profondeur). L'énergie géothermique peut alors fournir chauffage et refroidissement pour les réseaux urbains, les petits et grands bâtiments, et quelques autres applications basses et moyennes températures.

Regeocities est dédié aux systèmes géothermiques peu profonds pour les villes.

✚ **Pompes à chaleur géothermiques:**

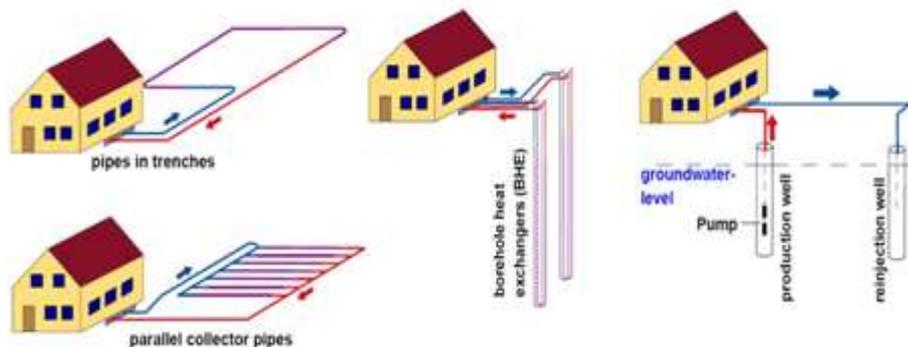


Figure I.13: Différents types des pompes à chaleur géothermiques [21].

✚ **Stockage souterrain d'énergie:**



Figure I.14: Stockage souterrain d'énergie [21].

I.3.2.1.1 Le fonctionnement des systèmes Géothermique à Très Basse Température :

a) Eléments de la GTBT et schéma de principe :

Les systèmes géothermiques à très basses température sont constitués de trois éléments principaux [21]:

- La boucle d'échangeurs géothermiques ou les nappes souterraines (capteurs horizontaux, capteurs verticaux, pieux ou corbeilles).
- La pompe à chaleur.
- Le système de distribution de la chaleur (plancher chauffant, ventilo-convecteurs, etc....) ou de distribution eau chaude sanitaire.

Une présentation détaillée de chacun des éléments est réalisée sur la figure I.15.

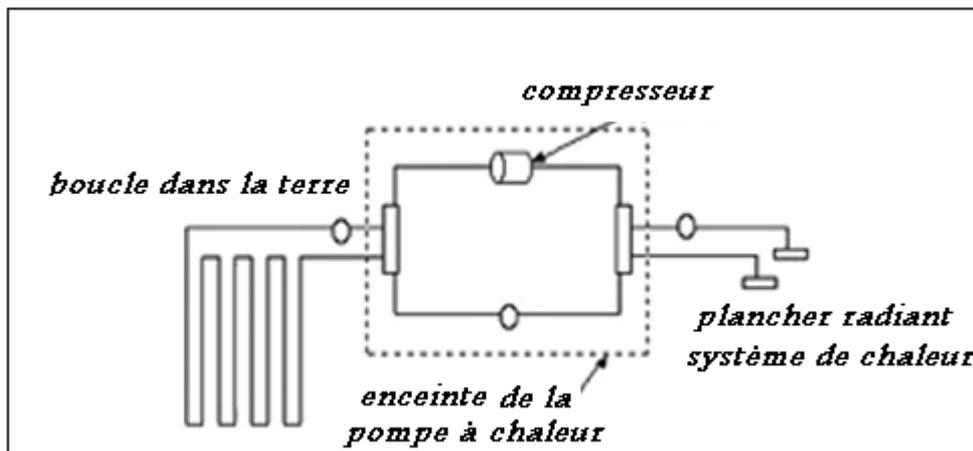


Figure I.15: Les différents éléments de la GTBT [21].

b) Types d'utilisation de l'énergie :

Il existe trois voies différentes d'utilisation de l'énergie produite par les systèmes géothermiques : le chauffage, l'eau chaude sanitaire et le rafraîchissement des bâtiments.

- **Chauffage** : Principal mode de fonctionnement de la GTBT, il est basé sur la connexion entre une pompe chaleur et un système de distribution de chaleur (plancher chauffant, ventilo-convecteur etc....).
- **Eau chaude sanitaire (ECS)** : Il est possible de récupérer une partie de la chaleur utilisée pour le chauffage afin de préchauffer ou chauffer de l'eau chaude sanitaire. Toutefois, sans fonctionnement du système de chauffage, le chauffage ou préchauffage de l'ECS n'est pas envisageable. Une autre possibilité est l'utilisation de « chauffe-eau

thermodynamique » autonomes, permettant de fournir de l'eau chaude sanitaire toute l'année.

- **Rafrâichissement :** Le rafraichissement des bâtiments à l'aide d'installation GTBT peut se faire soit de façon directe, soit en utilisant le mode réversible de la pompe à chaleur ou de la thermofrigopompe. Le rafraichissement direct ou " natural cooling " ou " free cooling " est basé sur le passage de l'eau d'une nappe phréatique ou de l'eau glycolée dans un échangeur.

c) Modes de fonctionnement des installations de GTBT :

Il existe différents mode de fonctionnement des installations de GTBT : le système peut fonctionner de façon passive ou naturelle, de façon active ou de façon saisonnière. La sélection s'effectue en fonction de la nature géologique et hydrologique du sol. Dans tous les cas, il est nécessaire de vérifier que la recharge du sol soit suffisante sous peine d'un mauvais fonctionnement de l'installation GTBT (appauvrissement jusque gel du sol / gonflement ...).

- **Recharge naturelle :**

La recharge naturelle ou passive ne nécessite aucune intervention externe. C'est le cas notamment des configurations où l'écoulement de l'eau est suffisant pour permettre une recharge thermique du sol.

- **Recharge active :**

Dans le cas d'une recharge naturelle non suffisante, il est nécessaire de faire en sorte que celle-ci s'effectue réellement afin d'éviter la dégradation thermique du terrain. Les risques encourus sont un bilan énergétique déficitaire ou excédentaire. La solution envisageable dans ce cas est une installation combinée permettant le rafraichissement et le chauffage ou utilisant une recharge par d'autres sources d'énergie (solaire, rejets thermiques, etc....)

- **Stockage saisonnier :**

Le stockage saisonnier permet une recharge active du sol, mais dans ce cas on cherche en plus de respect de l'équilibre thermique, on cherche à minimiser la part des énergies fossiles. Le sous-sol possède de manière générale de très bonnes propriétés de stockage de la chaleur. Sa chaleur spécifique volumique est de 0,42 à 0,78 kWh.m⁻³.K⁻¹ et sa conductivité thermique s'étend de 1 à 3 W.m⁻¹.K⁻¹.

Avec l'aide de capteurs solaires par exemple, de la chaleur issue du rayonnement solaire est stockée dans le sol en recourant à des champs

de sondes géothermiques. L'accumulateur de chaleur est constitué de tubes verticaux, soit montés dans des forages, soit battus directement dans le sol, le stockage peut alors être saisonnier (Figure I.16). Le cycle périodique de charge et de décharge permet l'exploitation combinée des stocks souterrains pour le chauffage et la climatisation.

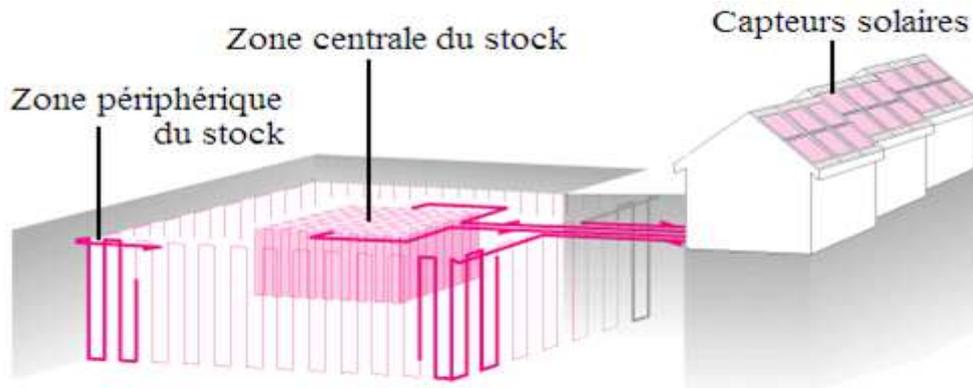


Figure I.16 : Stock souterrain saisonnier [21].

Une autre possibilité est un mode de fonctionnement différent entre l'hiver et l'été.

En hiver, de la chaleur est prélevée du stock souterrain et utilisée à des fins de chauffage soit en recourant à une pompe à chaleur soit directement.

En été, on exploite les températures relativement basses du stock souterrain pour la climatisation, permettant ainsi de le recharger. Le capteur solaire thermique assure dans ce cas le préchauffage de l'eau chaude sanitaire et la régénération thermique du stock par utilisation de l'énergie solaire excédentaire. Finalement le couplage permet le maintien des performances énergétiques du système sans risque de déplétion thermique.

I.3.3 Le stockage Murs capteurs, Murs Trombe :

L'utilisation passive de l'énergie solaire est un thème qui a été très étudié. Cette technique permet de faire diminuer les besoins de chauffage (en climat tempéré ou froid). Quelques règles techniques architecturalement assez simples ont été élaborées.

Une règle importante (en considérant au préalable que le bâtiment est orienté au Sud) consiste à mettre plus de vitrage sur la façade sud que sur la façade Nord du bâtiment, avec du vitrage à faibles pertes thermiques ($U < 2 \text{ w/m}^2.\text{K}^{-1}$). Il est également souvent plus avantageux de concevoir un bâtiment avec plus de vitrage sur la façade Est que sur la façade Ouest pour limiter les surchauffes de l'été. De même, pour éviter un apport de gain solaire trop important l'été par le vitrage de la

façade sud, il faut installer des brises soleil opaques au-dessus de ces vitrages afin de laisser passer le soleil l'hiver et de protéger les vitrages l'été. Rappelons également qu'une des règles indissociables de la conception bioclimatique est de prévoir une isolation thermique suffisante pour avoir de faibles besoins de chauffage, par l'extérieur des parois si l'on veut profiter de l'inertie de l'enveloppe du bâtiment [22], (la figure I.17).

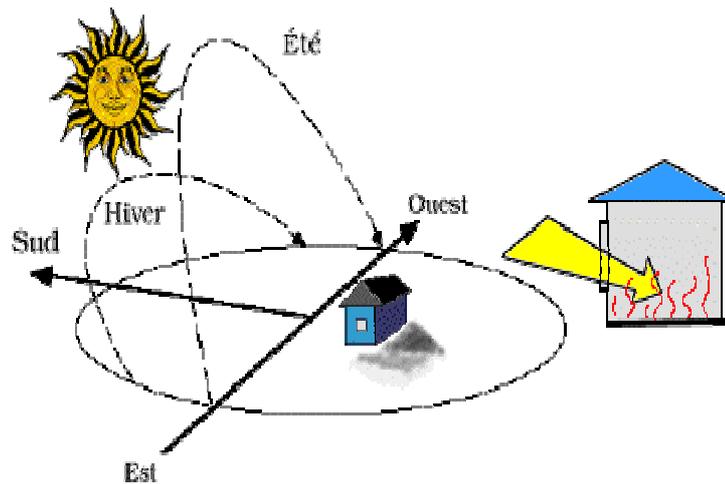


Figure I.17 : l'orientation du bâtiment [11].

Ces deux systèmes permettent de valoriser le rayonnement solaire en associant deux propriétés physiques :

- L'effet de serre à travers le vitrage.
- L'inertie du mur.

I.3.3.1 Principe du mur capteur :

Le rayonnement solaire est valorisé par effet de serre, en disposant un vitrage devant un mur en béton. L'énergie solaire est transmise par conduction à travers le mur puis par rayonnement à l'air de la pouvant atteindre 11 heures si l'épaisseur du béton de 40cm. Ce déphasage permet de chauffer la pièce au moment où il n'y a plus de soleil.

En raison des pertes, le mur capteur ne restitue pas la nuit toute l'énergie reçue durant la journée. Afin de limiter ces pertes, il faut prévoir une isolation nocturne ou mettre en œuvre un double vitrage [23], une présentation détaillée de principe du mur capteur est réalisée sur la figure I.18.

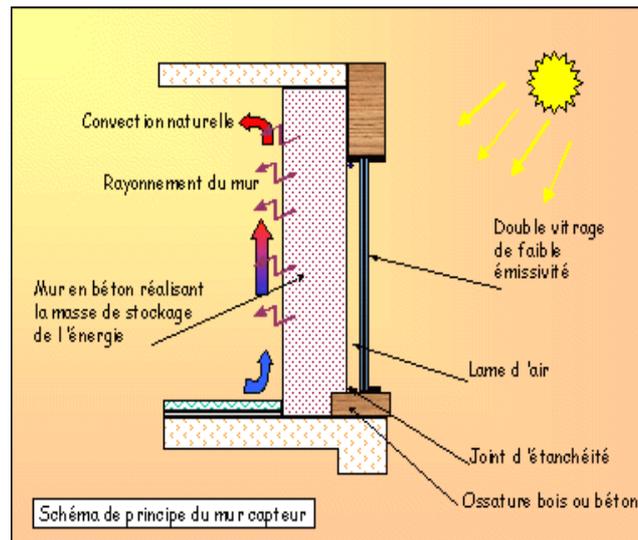


Figure I.18: Schéma de principe du mur capteur [23].

Pour favoriser l'absorption de la chaleur, on applique une peinture sombre sur la surface extérieure du mur, marron par exemple.

I.3.3.2 Principe du mur trombe :

Il s'agit d'un vitrage suivi d'une lame d'air et d'un mur en béton. Des ouvertures hautes et basses sont réalisées dans le mur afin de créer une circulation d'air par thermosiphon entre la lame d'air et l'air du local à chauffer, la figure I.19 montre leur principe.

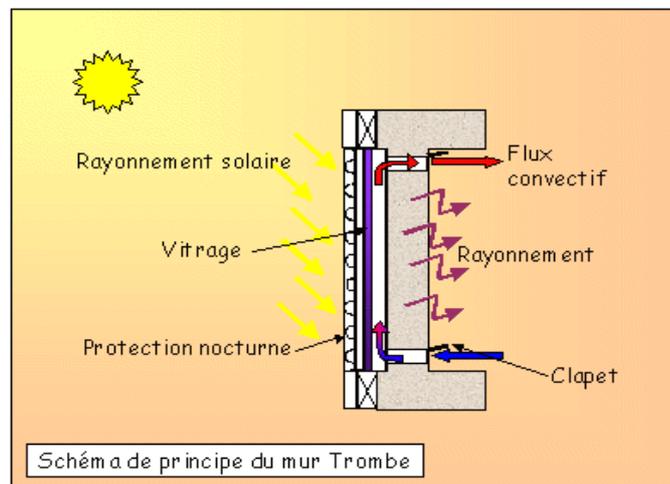


Figure I.19: Schéma de principe du mur Trombe [23].

L'air chauffé dans la lame d'air pénètre par les ouvertures supérieures dans la pièce. Il se refroidit au contact de l'air du local et, une fois rafraîchi, revient par les ouvertures inférieures dans la lame d'air [23].

En l'absence de rayonnement solaire, le flux convectif s'inverse pouvant provoquer un refroidissement accéléré de la pièce. Pour éviter

cela, il est alors nécessaire de disposer des clapets à fermeture manuelle ou automatique.

I.3.3.3 Comparaison :

Tableau I.2: « la comparaison entre le mur capteur et mur Trombe [22]».

| | Le mur capteur | Le mur Trombe |
|---------------------------------|--|---|
| Transfert thermique | Transmission de la chaleur avec un déphasage fonction de l'épaisseur du Mur. | Transmission directe : environ un tiers de l'énergie totalement restituée ; Restituée du reste de l'énergie déphasée. |
| Valorisation des apports | Valorisation des apports directs, s'il est associé à un vitrage simple (Mur capteur en allège et vitrage au dessus). | Valorisation des apports directs et des apports déphasés. |
| Coût | Comparable à celui d'un mur classique. | Coût plus élevé, pas de fabricants de systèmes : les ouvertures doivent être faites sur mesure par le menuisier sur chaque chantier. Mise en œuvre plus compliquée et plus chère. |
| Maintenance | Quasi inexistante. | Gestion quotidienne des clapets. Possibilité d'ouverture et de fermeture automatique. |

I.3.4 Isolation thermique :

L'isolation thermique a un triple but, répond aux besoins [24]:

- Diminuer le coût du chauffage : les pertes de chaleur d'une maison sans isolation sont nombreuses et importantes suivant les endroits. Il en résulte que plus votre isolation sera performante, moins élevée sera votre note de chauffage.

- Augmenter votre confort: le niveau de confort thermique d'une habitation est déterminé par la température de surface des parois et la température de l'air.

- Protéger votre patrimoine: une meilleure isolation protège en effet d'une part votre habitation, neuve ou existante, contre les effets pervers des chocs thermiques successifs; et d'autre part, votre environnement grâce à la limitation de consommation d'énergie ainsi permise.

Un mur en pierre, même plus de 80 cm d'épaisseur, n'empêche nullement la chaleur de s'échapper vers l'extérieur. Il faut donc isoler votre habitation soigneusement, en commençant par le toit s'il est la première source de déperditions, puis les murs, et enfin les planchers si ceux-ci donnent sur une cave ou un vide sanitaire.

Améliorer le confort thermique d'hivers passe par un diagnostic des bâtiments et des installations de chauffage. Des spécialistes (architectes, entreprises, bureaux d'études) sont susceptibles d'effectuer ces diagnostics et de préconiser des solutions. Quelques réflexes permettant d'orienter les choix parmi les mesures proposées [23]:

- Commencer par isoler les combles (s'ils existent) avant les parois verticales en maison individuelle (la majeure partie des pertes de chaleur se fait par le toit),

- Isoler les murs en contact avec l'extérieur (résultat qui peut être obtenu soit en plaçant un matériau isolant à l'intérieur ou à l'extérieur du logement).

- Veiller à maintenir ou à rétablir la circulation d'air dans le logement en cas de changement de fenêtres (il ne suffit pas que les nouvelles fenêtres présentent des entrées d'air, il faut aussi que l'air puisse ressortir du logement),

- Remplacer des simples vitrages par des doubles vitrages,
- Mettre en place une régulation du système de chauffage,
- Examiner les possibilités de changement de mode de chauffage ou d'énergie utilisée.

Les moyens les plus employés pour se protéger de la chaleur estivale sont :

- La ventilation par ouverture des fenêtres lorsque cela est possible (zone peu bruyante, pas de risque d'intrusion),

- La mise à profit de l'inertie thermique du bâtiment, c'est-à-dire profité de la capacité que le bâtiment a le pouvoir de stocker la fraîcheur de la nuit pour limiter l'élévation de la température le jour. Pour un bâtiment existant, l'inertie peut être augmentée par la pose d'une isolation thermique par l'extérieure.

- La limitation des apports solaires à travers les ouvertures (portes et fenêtres), à l'aide de volets ou de stores.

I.3.5 Les déperditions thermiques d'une maison:

Dans un bâtiment mal isolé, les déperditions thermiques sont importantes et engendrent des consommations d'énergie importantes pour le chauffage des pièces et de l'eau chaude sanitaire en hiver voire le recours à la climatisation en été. En plus des économies énergétiques directes, l'isolation thermique alliée à une bonne ventilation réduit les coûts d'entretien et les risques d'humidité et augmente la durée de vie de la maison [24].

Le schéma suivant présente en pourcentages indicatifs les pertes de chaleur d'une maison traditionnelle non isolée.

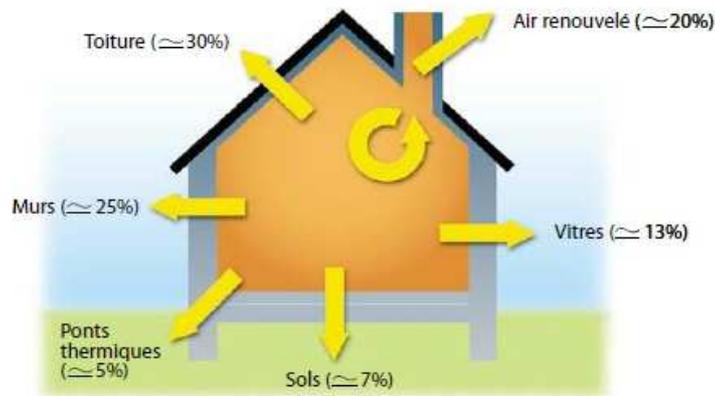


Figure I.20 : Ensemble des déperditions thermiques d'une maison non isolée [19].

Conclusion :

Dans cette partie, on a présenté un récapitulatif de quelques notions de bases relatives au gisement solaire, qui nous permis par la suite d'exploiter l'énergie solaire pour le chauffage et la climatisation par voie solaire.

L'utilisation de l'énergie solaire thermique redevient d'actualité grâce à son formidable impact sur la réduction des émissions de CO₂ et à des installations performantes.

Ainsi pour les installations collectives, la mise en œuvre de la garantie de résultats solaires est une donnée incontournable.

Pour exploiter ou stocker cette énergie solaire il faut la convertir en une autre forme d'énergie, pour cela on utilise les capteurs solaires.

On retiendra que lorsque deux corps sont à des températures différentes, il y a transfert thermique d'énergie du plus chaud vers le plus froid. On distingue trois modes de transfert thermique chacun régi par des lois bien spécifiques : la conduction, la convection et le rayonnement.

A decorative frame with rounded corners and a light beige border. Inside the frame, a purple lily flower is positioned in the upper right corner, with a hummingbird hovering above it. At the bottom, there is a light blue ribbon and another purple lily flower, with pink and red swirling vine-like patterns extending across the bottom edge.

Chapitre II

Etude théorique d'un capteur plan à air

Introduction :

Les capteurs plans à air sont les éléments chargés de capter l'énergie solaire (radiante) en la transformant en énergie thermique. Il joue aussi le rôle d'échangeur en cédant cette énergie captée au fluide colporteur (air) qui les traverse. Les usages sont multiples ; à savoir ; le chauffage des locaux, le séchage, etc.

Leur conception est orientée selon l'efficacité recherchée, leurs destinations et les coûts engendrés par l'installation. Plusieurs modèles ont été construites et étudiés afin de cerner les différents paramètres qui les caractérisent en vue de dégager une normalisation qui peut être standardisée par la suite.

II.1 Description d'un capteur solaire plan à Air :

II.1.1 Définition d'un capteur solaire plan à Air :

Les capteurs solaires plans offrent des solutions pratiques, rentables, pour répondre aux besoins des systèmes de chauffage solaire actifs.

L'avantage de ces capteurs c'est qu'ils peuvent être intégrés aux toitures, aux murs des maisons en étant posés sur des supports conçus pour cela ou faisant partis de la structure du bâtiment.

L'installation des capteurs sur le toit d'un bâtiment permet de réduire les pertes entre les capteurs, le stockage et l'espace à chauffer, et d'éviter l'ombre des maisons et des arbres environnants.

En général, ils sont fixes à cause du cout et de l'entretien qu'exigent les éléments mobiles.

Ils sont orientés plein sud, avec une inclinaison voisinant 45 degrés de façon à obtenir un gain de chaleur maximum surtout en période hivernale [25].

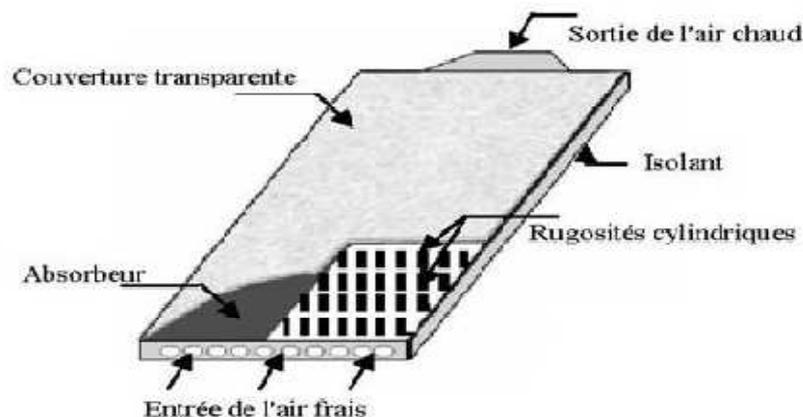


Figure II.1 : Capteur plan à air [4].

II.1.2 Principe de fonctionnement :

Consiste à emprisonner l'énergie apportée par le rayonnement solaire avec le minimum de pertes.

Un flux solaire traverse la couverture transparente et vient chauffer l'absorbeur derrière cette vitre, il se trouve donc piégé puisque le rayonnement émis par ce corps ne peut traverser la vitre. La chaleur est donc bloquée entre l'absorbeur et la couverture : c'est l'effet de serre [4].

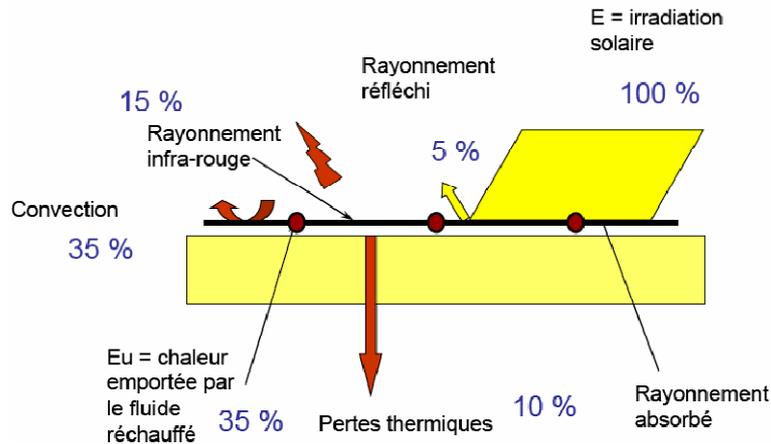


Figure II.2 : Principe de fonctionnement des capteurs solaires non vitrés à revêtement sélectif [1].

II.1.2.1 L'effet de serre :

L'effet de serre est un effet souvent mis à profit pour la conversion thermique à basse température du rayonnement solaire ou désigné par « effet de serre ». L'ensemble des modifications apportées à l'équilibre énergétique et thermique d'un corps récepteur (sol. Par exemple). Par la mise en place d'un couvercle de verre, transparent au rayonnement solaire et opaque au rayonnement terrestre. La présence de la vitre a pour effet d'absorber totalement le rayonnement émis par le récepteur et d'être le siège d'une émission par ses deux faces, en fonction de sa température propre [8]. L'effet de serre est généralement associé à la seule notion de modification des échanges radiatifs entre le récepteur et l'atmosphère, bien que son efficacité vis-à-vis des pertes par convection soit le plus souvent comparable. Il n'accroît aucunement l'énergie solaire disponible sur le récepteur, au contraire, celle-ci diminue. Le principal résultat de l'effet de serre est d'accroître la température limite d'équilibre du récepteur. L'effet de serre d'un vitrage apparaît ainsi comme particulièrement utile chaque fois que les échanges.

Par rayonnements prévalent sur les autres pertes, c'est-à-dire lorsque des températures relativement élevées sont recherchées au récepteur.

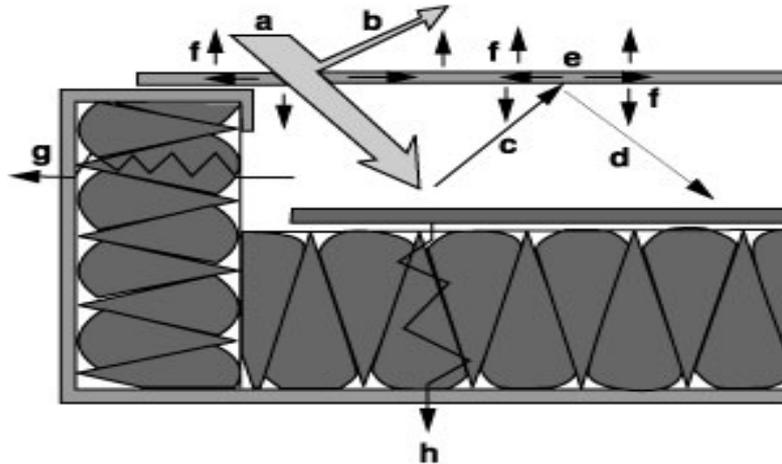


Figure II.3 : Schéma montrant le principe de l'effet de serre [8].

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.1.3 Les principaux éléments du capteur solaire plan à air :

Un capteur est constitué constituée de trois parties principales [4]:

🔧 Partie avant :

C'est la couverture transparente constituée du verre ou du plastique et qui peut être simple, doublée ou triplée. Cette couverture doit assurer trois fonctions essentielles :

- Recevoir le maximum du rayonnement incident sans réflexion ni diffusion importante.
- Transmettre la plus part du rayonnement reçu.
- S'opposer aux déperditions thermiques par convection et rayonnement.

🔧 Partie absorbante :

C'est au niveau de laquelle s'effectue la conversion thermique, et qui doit assurer les fonctions suivantes :

- Absorber la plus grande partie du rayonnement incident.

- Transmettre la chaleur produite par cette absorption vers le fluide caloporteur.
 - N'accepter que le minimum d'échanges thermiques vers l'extérieur pour rendre efficace cette partie.

Partie arrière :

Elle est généralement constituée d'une couche isolante, qui diminue les pertes par convection et ralentit ainsi le refroidissement de la face opposée au rayonnement solaire. Le choix du matériau à utiliser dépend de :

- Sa résistance aux températures de fonctionnement.
- La permanence de ces caractéristiques dans le temps (conductivité thermique).
- La résistance aux chocs, à l'humidité, au feu, à l'eau de pluie...etc.

II.1.4 Le rôle de chaque composante :

II.1.4.1 La couverture transparente :

La couverture a un rôle de protecteur mécanique de l'absorbeur. Sa fonction est de réduire les pertes thermiques vers l'extérieur [8].

Elle intervient au niveau [25]:

- Des échanges convectifs, qui dépendent aussi de l'espace entre absorbeur et la couverture, qui constitue la veine d'air immobile, d'une hauteur comprise entre 15 et 40mm.
- Des échanges radiatifs (bonne transparence aux rayons solaires et opaque aux infrarouges).
- elle doit, résister aux chocs, présenter un faible coefficient de distillation et de flexibilité.

Si on élimine tous les facteurs, on obtient un produit de qualité qui permet de contribuer à l'amélioration du rendement du capteur solaire, surtout en période hivernale avec des rayonnements intermittents. Dans certains cas, la plupart des oxydes de fer sont éliminés, ces verres transmettent jusqu'à 94% du flux solaire [25].

L'utilisation du double vitrage permet de réduire les pertes thermiques par rayonnement et convection, mais on note une réduction allant jusqu'à 15% du flux solaire. Le bilan thermique demeure favorable dans le cas des systèmes de moyennes et hautes températures, par contre pour basses températures, les procédés à simple vitrage sont plus favorables.

Dans ce cadre, «Bourhaleb.H» (1987) [25]. A été fait une étude expérimentale sur des capteurs double vitre et une seule vitre et il a trouvé que ce facteur influe fortement sur l'efficacité du capteur.

S.Youcef-Ali (2005) [26], a montré dans une étude expérimentale que la couverture triple donne des performances plus importantes que celle à double vitre grâce a la minimisation des pertes vers l'extérieur.

- **Polycarbonate :**

Le polycarbonate double vitrage, d'un prix élevé, permet de réduire d'une façon importante les pertes thermiques (face avant), mais diminue sensiblement la transmission du rayonnement solaire surtout lorsque l'angle d'incidence est supérieur à 45 degrés [25].

Tableau II.1 : « Propriétés de quelques surfaces transparentes au rayonnement solaire mais opaques au rayonnement infrarouge [5]».

| Matériau | Facteur de transmission solaire (%) | Masse volumique (kg/m ³) | Chaleur massique (J/kg.K) | Conductivité thermique (W/mK) | Dilatation thermique (K ⁻¹) |
|------------------------------|-------------------------------------|--------------------------------------|---------------------------|-------------------------------|---|
| Verre | 85-92 | 2700 | 840 | 0.93 | 0,9 . 10 ⁻⁵ |
| Polycarbonate | 82-89 | 1200 | 1260 | 0,2 | 6,6 . 10 ⁻⁵ |
| Polyméthacrylate | 89-92 | 1200 | 1460 | 0,2 | 7 . 10 ⁻⁵ |
| Polyester armé | 77-90 | 1400 | 1050 | 0 ,21 | 3,5 . 10 ⁻⁵ |
| Polytéréphtalate éthylène | 84 | 1,38 | 1170 | 0,25 | 7 . 10 ⁻⁵ |
| Polyfluoro-éthylène opoylène | 97 | 2,15 | 1170 | 0,25 | 10 ⁻⁴ |
| Polyflurure vinyle | 93 | 1,50 | 1380 | 0,12 | 4 . 10 ⁻⁵ |

Les inconvénients du verre sont sa fragilité, son poids et son prix élevé en double vitrage. [5]

L'inconvénient principal des matériaux plastiques est la dégradation de certaines de leurs propriétés avec le temps pour certains, ou le prix élevé pour d'autres [25].

Donation Njomo (1998) [27], a souligné d'après une étude numérique, qu'un capteur avec double couverture de matière différente (ici la couverture extérieure est en plexiglace et celle intérieure est en verre) a des performances meilleures qu'un capteur a deux vitres de même matière.

II.1.4.2 L'absorbeur :

L'absorbeur est l'élément essentiel dans un capteur solaire, car il doit absorber le plus grande partie du rayonnement et transmettre la chaleur au fluide caloporteur avec un minimum de pertes [8].

• **Ses caractéristiques :**

Il doit être bon conducteurs, léger pour éviter l'inertie thermique. Certains absorbeurs ont des surfaces traitées pour piéger les rayons solaires. Ces surfaces devront être [25]:

- De faible épaisseur pour assurer un passage convenable de l'énergie captée.
- Stable dans le temps pour conserver ses propriétés d'origine.

En général, ces revêtements sont faits par des traitements chimiques, et d'autres à base de peinture noire sélective.

Tableau II.2 : «Caractéristiques thermo-physiques de matériaux métalliques [5]»

| Matière | Conductibilités (w/m°C) | Chaleur massique (Kcal/Kg°C) | Masse volumique (Kg/m³) |
|----------------------|------------------------------------|---|---|
| Aluminium | 230 | 0.214 | 2700 |
| Cuivre | 380 | 0.094 | 8930 |
| Zinc | 112 | 0.092 | 7130 |
| Acier | 52 | 0.174 | 7900 |
| Inox | 52 | 0.17 | 7900 |
| Matière Plast | 0.2 – 0.4 | 0.2 – 0.25 | 1000- 1500 |

Deux coefficients déterminent les caractéristiques de ces absorbeurs [25]:

- α : coefficient d'absorption (optimal : 1).
- ε : coefficient d'émission (optimal : 0).

Selon les caractéristiques escomptées, le traitement de surface peut être obtenu par des procédés électrochimiques ou électro-physiques.

Nous résumons les propriétés des revêtements dans le tableau ci-dessous [5]:

Tableau II.3 : « Propriétés optiques des revêtements les plus utilisés ».

| Revêtement | Absorption : α | Emmision : ε |
|----------------------|---|--|
| Peinture noire | 0,9 – 0,95 | > 0,85 |
| Black chrome | 0,95 | 0,12 – 0,18 |
| Traitement sous vide | >0,95 | < 0,05 |

Chapitre II : Etude théorique d'un capteur solaire plan à air.

Par ailleurs, la forme de l'absorbeur influence également le rendement du capteur. Ainsi la figure II.4 montre les formes les plus utilisées dans les capteurs solaires commercialisés [28]:

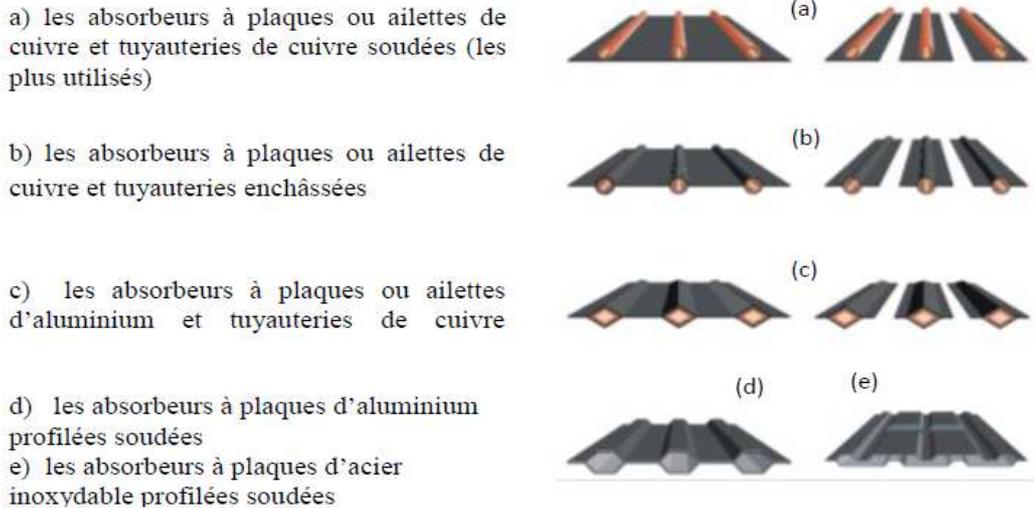


Figure II.4 : Diverses formes d'absorbeurs (d'après DGS Solar Antalgen [29]).

De ce fait, des chercheurs ont proposé d'augmenter le transfert thermique entre l'absorbeur et le fluide caloporteur (sans toucher les dimensions du capteur) par l'ajout des obstacles (ailettes) (Figure (II.5)) jointes à la face inférieure de l'absorbeur, «Bourhaleb.H» (1987) [25], (N. Moumami et al (2004) [30], A. Abene et al (2004) [31], S. youcef-Ali (2005) [26], A. Ucar et M. Inalli (2006) [32], Hikmet Esen (2008) [33], Ho-Ming yeh et Chii-Dong Ho (2009)) [34], selon ces auteurs, les obstacles peuvent augmenter la surface d'échange, réduire les zones mortes et créer la turbulence.

«Bourhaleb.H» (1987) [25], et aussi A. Abene et al (2004) [31], ont montré que la forme, les dimensions, l'orientation et la disposition de ces obstacles influents considérablement sur l'efficacité du capteur (comme souligné par K. R. Ahrwal et B. K Gandhi (2008) [35]).



Figure II.5 : Différentes formes des ailettes ajoutées à l'absorbeur pour améliorer l'efficacité de l'absorbeur (A. Abene et al (2004)) [31].

II.1.4.3 Veine d'air :

Pour une veine d'air immobile comprise entre 1.5 et 3.5 cm le coefficient d'échange convectif reste inchangé.

Dans le cas où la hauteur de cet espace d'air dépasse 4cm, les mouvements de convection deviennent importants, car l'air se déplace en fonction des variations de température, en suivant les lois des gaz.

Il faut qu'elle soit étanche et veiller aux pressions obtenues pour éviter le dépôt d'humidité sur la vitre [25].

II.1.4.4 Veine d'air mobile :

La géométrie du circuit empreinte par le fluide caloporteur à une importance capitale sur l'échange thermique. Il est nécessaire d'assurer une irrigation totale de la surface de l'absorbeur pour éviter des zones mortes, pour cela on a introduit des chicane de forme bien définie, dont les détails seront précisés par la suite [25].

II.1.4.5 Le fluide caloporteur :

Le fluide caloporteur est chargé de transporter la chaleur entre deux sources ou plusieurs sources de température. Il est choisi en fonction de ses propriétés physiques et chimiques, il doit posséder une conductivité thermique élevée, une faible viscosité et une capacité calorifique élevée [8].

Dans notre travail on utilise l'air, la façon de passage de l'air a une influence considérable sur l'efficacité du capteur solaire.

Selon M. N. Bargach et al (2004) [36], C. D. Ho et al (2005) [37], l'augmentation de la circulation du fluide caloporteur augmente la puissance du capteur solaire.

De même M. Augustus Leon et S. Kumar (2007) [38], ont montré que le débit d'air a l'effet le plus fort sur l'efficacité d'échanges thermiques et par conséquent sur le rendement.

D'après le travail expérimental et numérique de Marwa. M. Hassan et Yvan Beliveau (2007) [39], la diminution du débit massique augmente la température du fluide et décroît les gains globaux de la chaleur, au dessus d'un débit de 0.06 m³/h, la température du fluide n'augmente plus.

II.1.4.6 L'isolant thermique :

Son rôle est très important surtout dans les applications solaires, elle permet de calorifuger le système.

Les isolants les plus utilisés sont [25]:

- La laine de roche et les mousses de polystyrène ou polyuréthane dont l'épaisseur varie de 4 à 8cm. Ces produits doivent résister aux températures de fonctionnement.

Rappelons que le meilleur isolant, c'est l'absence de matières, donc le vide absolu, assez couteux mais efficace. Il est utilisé surtout dans les capteurs à hautes températures.

Tableau II.4 : « Propriétés thermiques de quelques matériaux isolants [5] ».

| Matériau | Facteur de transmission solaire (%) | Masse volumique (kg/m³) | Chaleur massique (J/kg.K) | Diffusivité (10⁻⁷ m²/s) |
|----------------------------|--|---|----------------------------------|--|
| Air | 0,025 | 1,2 | 1003 | 208 |
| Mousse de Polyuréthane | 0,029 | 30 | 1600 | 6,0 |
| Laine de verre | 0,036 | 40 | 840 | 10,7 |
| Polyester expansé | 0,040 | 20 | 1500 | 13,3 |
| Papier de journal comprimé | 0,105 | 130 | 1340 | 6,0 |
| Bois de pin | 0,118 | 500 | 1210 | 1,95 |
| Plâtre | 0,35 | 800 | 800 | 5,5 |

Selon N. T. Ahmed (2001) [40], on peut réduire ces pertes en utilisant de l'isolation transparente (ici un film de bulles d'air). Aussi Fayza Benyelles et al (2007) [41], ont montré qu'on peut utiliser l'aérogel (matériau poreux de faible conductivité thermique) comme une superbe isolant de la face avant du capteur solaire plan.

II.1.4.7 Le coffre :

Il permet l'assemblage des différents éléments du capteur. Il doit assurer une protection efficace aux agents atmosphériques. Il est réalisé en bois ou en aluminium [25].

II.1.5 Principaux paramètres caractérisant un capteur :

Le fonctionnement d'un capteur solaire est caractérisé par de nombreux paramètres dont les plus importants sont [25]:

II.1.5.1 Le rendement :

Le rendement d'un capteur est le rapport entre l'énergie extraite par le fluide caloporteur pendant un intervalle de temps donné et le produit de l'irradiation solaire pendant le même intervalle de temps, sur le capteur par sa superficie, dans les conditions de l'état stationnaire.

II.1.5.2 La superficie :

La superficie d'entrée est l'aire maximale de la section droite du rayonnement pouvant atteindre le volume contenant l'absorbeur, directement ou par réflexion.

II.1.5.3 La stagnation :

La stagnation est l'état d'un capteur ou d'un système sans circulation du fluide caloporteur.

La température de stagnation se réfère généralement à la température du fluide caloporteur sans circulation où les déperditions thermiques sont égales au flux du rayonnement solaire incident.

II.1.5.4 Orientation et inclinaison des capteurs solaires :

Les capteurs solaires sont orientés et inclinés suivant l'utilité que l'on désire donner au système. En général, l'orientation des capteurs dans l'hémisphère nord doit être plein sud, car le soleil suit chaque jour une trajectoire apparente Est-sud-ouest, à l'encontre dans l'hémisphère sud où l'orientation doit être vers le nord [5].

Beaucoup d'études ont été menées pour déterminer ou du moins estimer, le meilleur angle de l'inclinaison des capteurs solaires. En pratique, la règle générale pour un utilisation annuelle est : $\varphi + 10^\circ$, tel que (φ) est la latitude du lieu, alors que certains chercheurs suggèrent deux valeurs pour l'angle optimal de l'inclinaison, un pour l'été ($\varphi - 20$) et l'autre pour l'hiver ($\varphi + 20$), Dans les dernières années, les programmes informatiques ont été utilisés et les résultats ont montré que l'angle optimum de l'inclinaison est presque égal à la latitude φ du lieu [42] (Figure II.6).

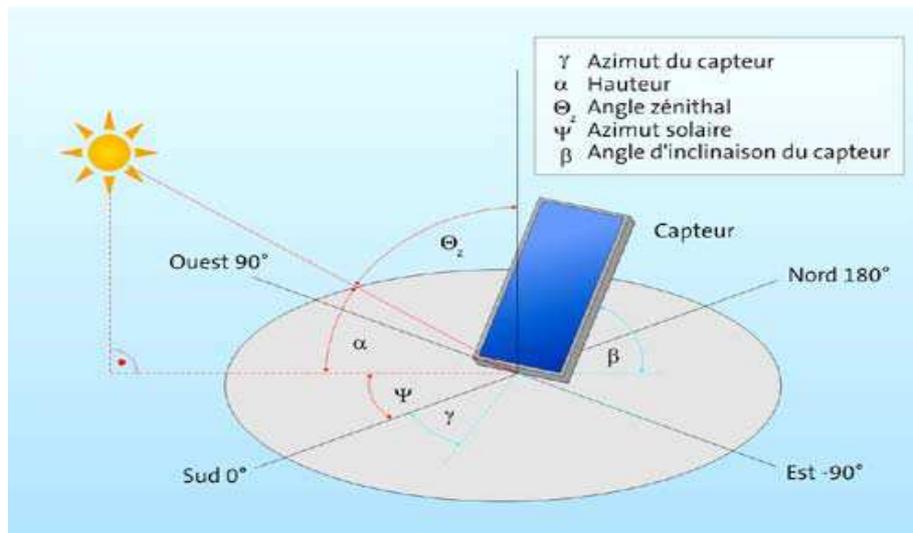


Figure II.6: L'orientation du Capteur solaire plan.

II.2 Etude des capteurs fonctionnant à basse température :

II.2.1 Etude théorique :

Le capteur héliothermique absorbe la plus grande partie de l'énergie incidente. La surface absorbante non isolée constitue le siège des déperditions thermiques vers l'extérieur [25].

II.2.1.1 Mécanisme des pertes :

La réémission du rayonnement se réalise à partir de l'absorbeur et de la vitre du capteur, l'air chaud compris entre ces deux éléments dans l'espace hermétiquement fermé tend à s'élever. Quand à l'air frais, il descend produisant ainsi un courant de convection naturelle. Des fuites d'air peuvent aussi se produire par des gradients de pression et de température accentuées par le vent [5-25].

Le but de l'opération c'est de récupérer le maximum de chaleur produite par le capteur en minimisant les pertes.

II.2.1.2 Equation linéaire simplifiée :

$$Q_u = Q_s - Q_p \quad (II.1)$$

Cette relation exprime le bilan thermique global d'un collecteur plan en régime permanent [25].

Si on veut augmenter l'énergie utile (Q_u) pour une température de fonctionnement, on peut envisager deux possibilités :

Augmenter (Q_s) ou diminuer (Q_p).

Le premier choix consiste à utiliser la concentration du flux solaire incident mais l'inconvénient c'est qu'elle ne peut intervenir que pour le rayonnement direct, donc concentrateurs ne sont envisagés que dans des conditions bien particulières.

Chapitre II : Etude théorique d'un capteur solaire plan à air.

La 2^{ème} démarche c'est de munir la surface absorbante d'un équipement sélectif, perméable à tout transfert énergétique dans le sens environnement – capteur.

II.2.1.3 Bilan de fonctionnement :

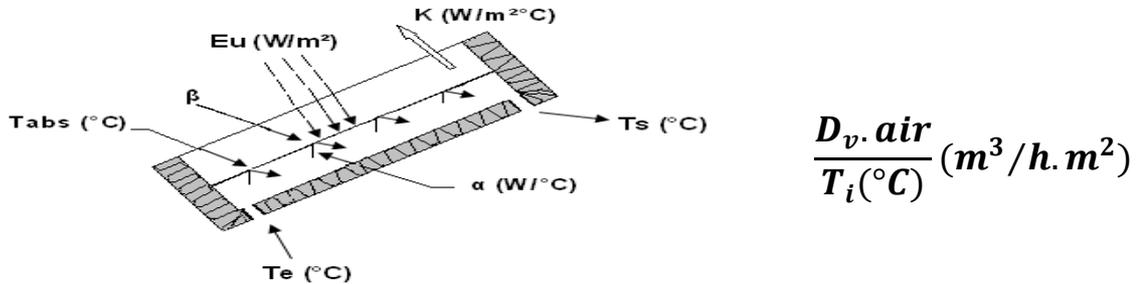


Figure II.7 : Schéma donnant le bilan thermique moyen d'un capteur solaire à air [25].

Les ouvrages généraux sur les capteurs solaires proposent des bilans énergétiques, sans préciser la nature de leur étude (expérimentation, simulation numérique ou étude théorique). De plus, ces références précisent rarement les caractéristiques du système étudié (sélectivité de l'absorbeur, épaisseur d'isolant, couverture, ...). C'est pourquoi, ces résultats sont à prendre avec précaution et surtout à titre indicatif. Ainsi, on peut citer le travail de Cardonnel [43], qui propose un bilan (voir figure II.8) sans préciser les hypothèses d'obtention de ces valeurs.

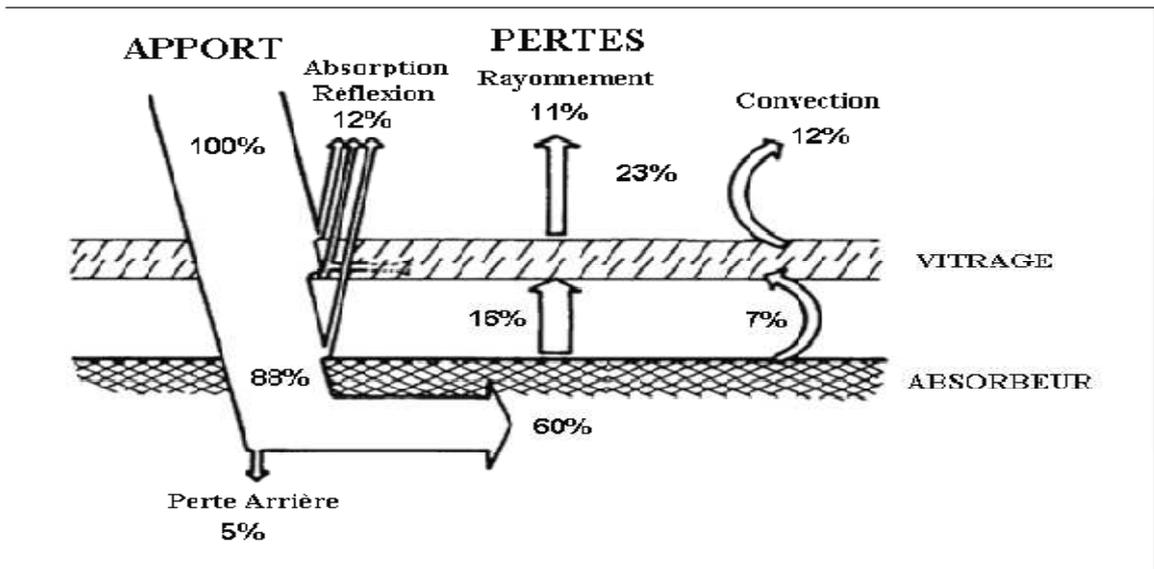


Figure II.8 : Schéma représentant Bilan thermique d'un capteur solaire plan vitré [29].

Cependant, les auteurs s'accordent à dire que les pertes latérales et arrières restent négligeables devant les pertes thermiques face avant du capteur qui demeurent les plus importantes ; on appelle face avant, la partie du capteur orientée vers le ciel entre l'absorbeur et l'extérieur.

Si on désigne par (Q_p) l'énergie perdue, qui est fonction de la qualité du capteur, de la température de fonctionnement, on a [25]:

$$Q_p = Q_{av} - Q_{ar} \quad (II.2)$$

Avec :

Q_{av} : Pertes par la face avant qui dépend de la transmission de la couverture et de l'absorbeur de cette face.

Q_{ar} : Pertes par la face arrière.

• **Pertes par la face arrière :**

$$Q_{av} = k(T_u - T_a) \quad (II.3)$$

Avec :

k : Coefficient d'échange thermique ($W/m^2°C$) [5].

$$k = \frac{1}{0.15 + \frac{\lambda}{e}} \quad (II.4)$$

λ : Coefficient de conductibilité thermique.

T_u : Température moyenne du fluide.

T_a : Température ambiante.

Ces pertes sont égales à $50W/°C$ pour une isolation (laine de verre) de 7.5 cm d'épaisseur.

• **Pertes par la face avant :**

$$Q_{ar} = Q_I + Q_{II} \quad (II.5)$$

Les pertes avant sont beaucoup plus importantes ; elles sont dues aux échanges radiatifs et convectifs.

• **Pertes par rayonnement : (absorbeur – vitrage)**

Il s'agit de deux parois parallèle face à face ; la quantité de chaleur échangée s'écrit :

$$Q_I = \sigma(T_{abs}^4 - T_{couv}^4) * \frac{1}{\frac{1}{\epsilon_a} + \frac{1}{\epsilon_c} - 1} \quad (II.6)$$

Cette formule s'applique pour le calcul du transfert absorbeur – vitre.

ϵ_a, ϵ_c : Émissivité des deux surfaces.

$\sigma = 5.68 \cdot 10^{-8} W/m^2 K^4$ (Constante de BOLTZMANN).

$$(T_{abs} - T_{couv}) = (T_{abs} - T_{vitrage}) \quad (II.7)$$

- **Pertes par convection** : (dans la lame d'air entre absorbeur – vitre)

$$Q_2 = h(T_{abs} - T_{couv}) \quad (II.8)$$

Avec :

h : Coefficient de transfert par convection.

Plusieurs déterminations ont été proposées pour définir ce coefficient en tenant compte de :

- La température moyenne de l'air.
- De la hauteur de la veine d'air.
- De l'état des surfaces.
- Des températures des surfaces.

Utilisons le nombre de « **NUSSELT** » et le celui de « **GRASHOF** », qui sont introduit par la similitude en mécanique des fluides :

$$Nu = \frac{h \cdot e}{k} \quad Gr = \frac{\rho \cdot \beta \cdot g \cdot AT}{\mu^2}$$

Avec :

k : Conductibilité thermique de l'air.

e : Épaisseur de la veine d'air.

g : Accélération de la pesanteur.

μ : Viscosité cinétique.

β : Dilation thermique de l'air.

Pour l'air dans les conditions d'emploi : $Pr=0.733$ [25] donc :

* **Conditions d'utilisations de ces relations :**

$10^4 < Gr < 10^7 \implies Nu=0.152 (Gr)^{0.28}$ pour capteurs horizontaux.

$Nu=0.093 (Gr)^{0.31}$ pour capteurs inclinés de

45°.

Si « Ψ » est l'angle d'inclinaison du capteur sur l'horizontale [25]:

$$Nu=0.060 - 0.017 (\Psi/90) \cdot (Gr)^{0.33}$$

Pour un capteur incliné de 45°, on trouve $h=3.5w/m^2 \cdot C$

$$(T_{abs} - T_{couv}) = 60 \implies Q_2 = 210w/m^2$$

En 1987 «Bourhaleb.H» [25]. Présente ces bilans thermiques :

- **Le bilan thermique entre Absorbeur et couverture est :**

$$Q_I = \frac{1}{\frac{1}{\varepsilon_a} + \frac{1}{\varepsilon_c} - 1} \sigma (T_{abs}^4 - T_{couv}^4) + h(T_{abs} - T_{couv}) \quad (II.9)$$

• **Pertes entre couverture et l'environnement :**

- Pertes avant par rayonnement entre couverture – environnement [25]:

$$Q_3 = \sigma \cdot \varepsilon_v (T_{couv}^4 - T_c^4) \quad (II.10)$$

- Pertes convectif de la couverture – environnement :

$$Q_4 = h_f (T_{couv} - T_a) \quad (II.11)$$

• **Bilan d'échange entre couverture – environnement :**

$$Q_{II} = Q_3 + Q_4$$

$$Q_{II} = \sigma \cdot \varepsilon_v (T_{couv}^4 - T_c^4) + h_f (T_{couv} - T_a) \quad (II.12)$$

Avec :

ε_a : Émissivité de l'absorbeur (=0.95 peinture noire mat).

ε_v : Émissivité de la couverture (=0.90 verre de 4mm d'épaisseur).

La formule de Klein est utilisée pour ce calcul [5] :

$$\varepsilon_v = \frac{T_{abs} - T_a}{\frac{c}{T_{abs}} \left[\left(\frac{T_{abs} - T_a}{N + f} \right)^{0.33} + \frac{1}{h_f} \right]} + \frac{\sigma (T_{abs}^4 - T_c^4)}{1 / [\varepsilon + 0.05N(1 - \varepsilon)] + \varepsilon_v / (2N + f - 1) - N} \quad (II.13)$$

Avec :

$$f = (1 - 0.04h_f + 0.0005h_f) \cdot (1 + 0.091N) \quad (II.14)$$

$$c = 365.9(1 - 0.00883\Psi + 0.00013\Psi^2) \quad (II.15)$$

$\sigma = 5.68 \cdot 10^{-6} \text{ w/m}^2\text{K}$ (constante de BOLTZMANN).

Ψ : Inclinaison des capteurs en degrés.

N : Nombre de couvertures.

ε : Facteur d'émission de l'absorbeur.

ε_v : Facteur d'émission de la couverture.

h_f : Coefficient d'échange entre couverture et air extérieur.

T_{abs} : Température moyenne de l'absorbeur en [K].

T_a : Température moyenne de l'air ambiant en [K].

T_c : Température moyenne de ciel.

Dans ce sens, Sartori [44] présente en 2006, une synthèse des principales relations permettant de déterminer ce coefficient de transfert convectif. La plupart de ces coefficients sont de la forme [25]:

$$h_{vent} = a + b \cdot V_{vent}^n \quad (II.16)$$

Ils diffèrent suivant les valeurs des paramètres a, b et n. Ainsi, MacAdams propose la relation suivante, qui est la plus couramment utilisée pour l'étude des capteurs solaires plans [7].

$$h_{vent} = 5.7 + 3.83 \cdot V_{vent} \quad (II.17)$$

Comme exemple, pour un vent nul, $h_f = 5.7 \text{ W/m}^2 \text{ }^\circ\text{C}$

Pour $V=20\text{km/h}$, $h_f = 27\text{W/m}^2 \text{ }^\circ\text{C}$

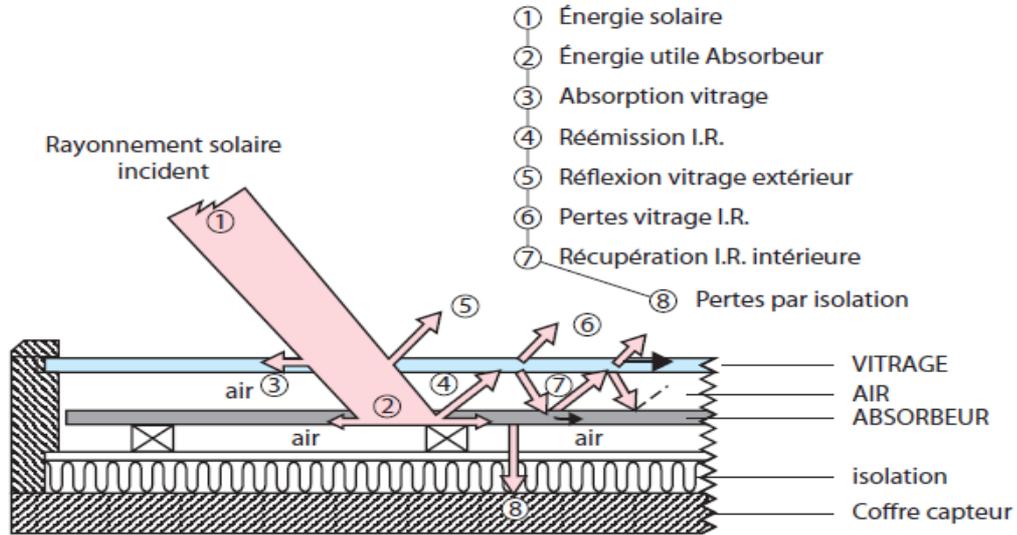


Figure II.9: les pertes thermiques dans un capteur solaire plan [5].

II.2.2 Modèle mathématique traduisant le fonctionnement d'un capteur :

Les différentes pertes estimées précédemment peuvent être regroupées sous forme d'équations simplifiées [25].

II.2.2.1 Puissance dissipée :

$$Q_p = Q_{av} + Q_{ar} \tag{II.18}$$

Pour les applications pratiques on introduit un coefficient de pertes globales k :

$$Q_{av} = K_{av}(T_{abs} - T_a) \tag{II.19}$$

$$Q_{ar} = K_{ar}(T_{abs} - T_a) \tag{II.20}$$

Donc :

$$Q_p = K(T_{abs} - T_a) \tag{II.21}$$

K , K_{av} et K_{ar} sont des coefficients d'échange thermique de l'absorbeur.

T_a : température moyenne de l'air ambiant.

Tableau donnant quelque valeur du coefficient K .

Pour $T_a=10^\circ\text{C}$, $V=5\text{m/s}$.

Tableau II.5 : « valeur du coefficient K » [25].

| T_{abs} | Vitrage | Abs. sélectif | K(w/m ² °C) |
|-----------|-----------------|---------------|------------------------|
| 40 | 0 | Non | 22 |
| 100 | 1 | Non | 8 |
| 100 | 1 | Oui | 4 |
| 100 | 2 | Non | 4.3 |
| 100 | 2 | Oui | 2.5 |
| 100 | 1 plasti-tadler | Non | 9.2 |
| 100 | 2 plasti-tadler | Non | 5.2 |

II.2.2.2 Puissance récupérée par un capteur plan :

$$Q_u = \dot{m} \cdot cp \cdot (T_s - T_e) \quad (II.17)$$

La mesure du débit et la variation de la température du fluide caloporteur à la traversée du capteur, permet grâce à cette équation de déterminer expérimentalement la quantité de chaleur recueillie et de déterminer les performances du capteur.

II.2.2.3 Performance d'un capteur :

En référence aux machines thermiques on utilise la notion de rendement d'un capteur déterminé par [25]:

$$\eta = \frac{\text{energie utile recueillie par le capteur}}{\text{energie solaire incidente sur le capteur}} \quad (II.22)$$

Il est important de remarquer que les conditions d'utilisation (le soleil, est une variable aléatoire) obligent à définir un rendement sur un intervalle de temps « dt » à préciser

$$\frac{\int_{t_1}^{t_2} \dot{m} \cdot cp \cdot (T_s - T_e) dt}{\int_{t_1}^{t_2} I dt} \quad (II.23)$$

On peut donc définir un rendement instantané, journalier, mensuel ou annuel pour comparer la performance des différents capteurs.

Avec :

\dot{m} : Débit massique.

Cp : capacité calorifique.

Ts: température sortie capteur.

Te: température entrée capteur

I: ensoleillement.

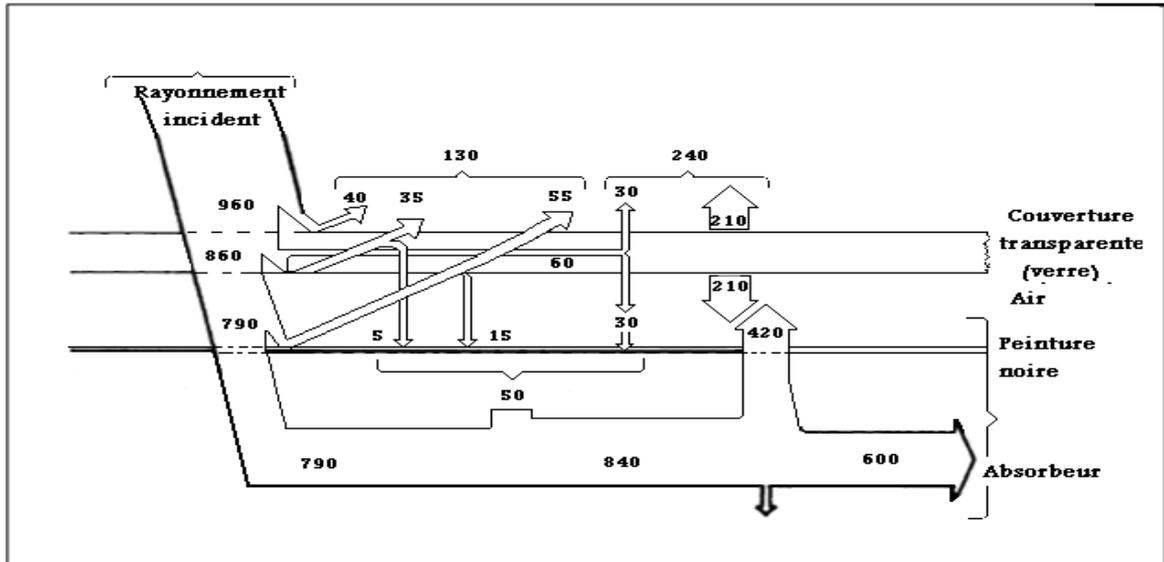


Figure II.10 : Schéma donnant un exemple numérique sur les échanges d'après D.ROUX [25].

Conclusion :

Le choix entre les types de capteurs solaires est déterminé par le type d'application recherchée, la fiabilité, le prix et les températures souhaitées.

A partir de cette étude théorique, on a plusieurs types de capteurs solaires plans, ainsi que le système de stockage en utilisant le mur Trombe.



Chapitre I

***Généralités sur
l'énergie solaire***

I.1 Généralités sur l'énergie solaire :

Introduction :

Les sources d'énergie jouent un rôle très important dans le développement de l'humanité, avec l'évolution industrielle et technologique de notre siècle.

La demande énergétique est croissante chaque année, pour cette raison il faut chercher sur une autre source d'énergie nouvelle plus précisément les énergies renouvelables et notamment l'énergie solaire [1].

L'énergie solaire est présentée par deux systèmes :

- Systèmes solaire thermique (chaleur):
 - Les capteurs solaires thermiques.
- Système solaire photovoltaïque (électricité):
 - Panneaux ou modules photovoltaïques.

Nous allons nous intéresser à l'exploitation de l'énergie solaire par voie thermique en utilisant un capteur solaire plan à air.

Un des problèmes essentiels de l'utilisation de l'énergie solaire est les faibles échanges thermiques réalisés avec l'air dans la veine dynamique du capteur solaire. Ces échanges ne permettent pas d'obtenir de meilleures performances ou une meilleure efficacité thermique de ses systèmes. Par contre, l'introduction de chicane (obstacles) disposées en rangées dans les conduits de ces systèmes améliore nettement les transferts thermiques [2].

I.1.1 Le soleil :

Le soleil est un énorme réacteur thermonucléaire, où l'hydrogène fusionne en hélium. L'énergie qu'il envoie dans toutes les directions est à la fois énorme (environ 10 000 fois les besoins terrestres), mais malheureusement assez diluée, puisque la puissance maximale reçue à l'extérieur de l'atmosphère sur une surface d'un mètre carré perpendiculaire à la direction du rayonnement est au maximum d'environ 1350 W (cette valeur est légèrement supérieure en hiver car la distance Terre-Soleil est minimale à ce moment-là). Pour récupérer une quantité d'énergie importante, il faut donc nécessairement augmenter la surface qui intercepte le flux solaire. Concentrer le rayonnement solaire n'augmente pas la puissance ou l'énergie récupérés, mais seulement le niveau de température pouvant être atteint [3], la figure I.1 représente le rayonnement solaire du soleil sur terre.

Chapitre I : Généralités sur l'énergie solaire.

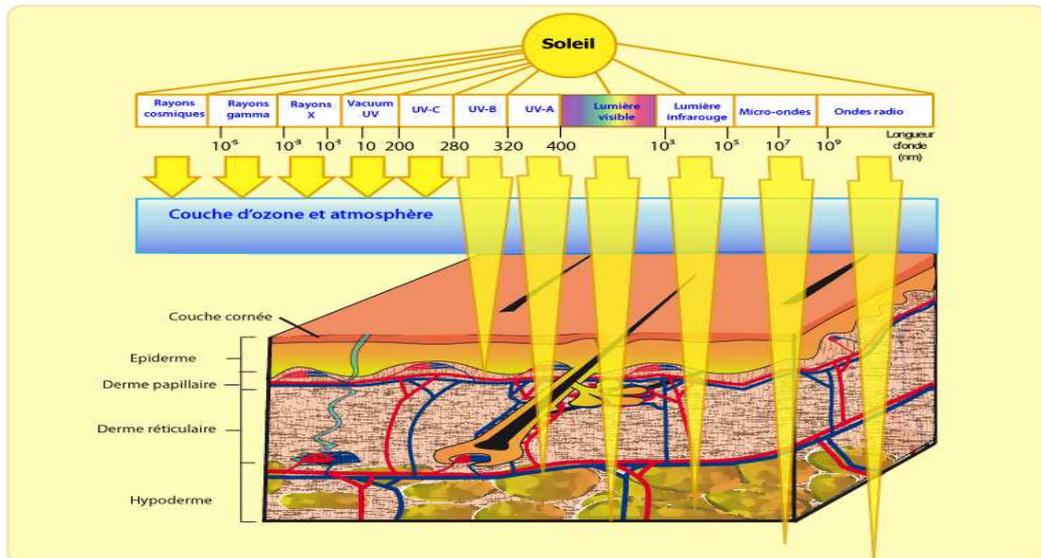


Figure I.1 : Rayonnement solaire du soleil sur terre [3].

I.1.1.1 Principes physiques : la lumière [4]

Le soleil émet des rayonnements principalement dans la partie «visible» du spectre (lumière, entre 400 et 700 nm). Plus la longueur d'onde du rayonnement est courte, plus la quantité d'énergie portée par les photons est grande (la figure I.2).

Cette énergie peut se transmettre sous forme de chaleur : l'énergie va exciter les atomes composant la matière, qui vont s'agiter et s'échauffer.

Exposés aux rayons du soleil, les capteurs vont convertir l'énergie des photons, soit en énergie thermique, soit en énergie électrique.

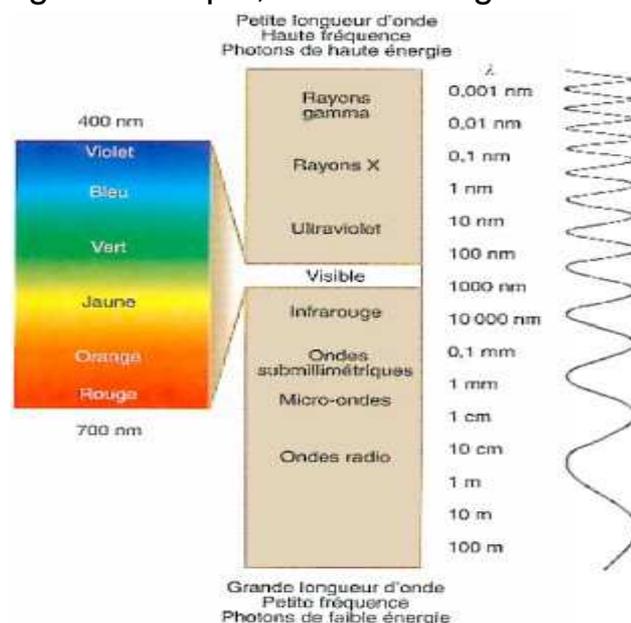


Figure I.2 : Schéma de composition du rayonnement solaire [4].

I.1.1.2 Les caractéristiques du soleil :

Le soleil est une étoile qui se compose de 73,46 % d'hydrogène, de 24,85 % d'hélium et d'une fraction d'éléments plus lourds. Bien que le soleil soit une étoile de taille moyenne, il représente à lui seul plus de 99 % de la masse du système solaire. Sa forme est presque parfaitement sphérique, avec un aplatissement aux pôles estimé à neuf milliardièmes. Les principales caractéristiques du soleil sont regroupées dans le tableau I.1. [5]

Tableau I.1 : « Caractéristiques principales du soleil ».

| Caractéristiques | | Valeur |
|----------------------------|--------------|---------------------------------------|
| Masse | | $1,9891 \times 10^{30}$ kg |
| Diamètre | | 1 392 000 km |
| Masse volumique moyenne | | 1 408 kg/m ³ |
| Surface | | $6,09 \times 10^{12}$ km ² |
| Volume | | $1,41 \times 10^{18}$ km ³ |
| Magnitude absolue | | 4,83 |
| Magnitude apparente | | -26,8 |
| Puissance rayonnée | | $3,83 \times 10^{26}$ w |
| Période galactique | | $2,26 \times 10^8$ années |
| Demi grand axe de la Terre | | 149 597 870 km |
| Vitesse | | 217 km/s ¹ |
| Gravité à la surface | | 273,95 m/s ² |
| Température | Au centre | 15,1 Millions K |
| | A la surface | 5770K |

I.1.1.3 La déclinaison :

L'axe de rotation de la terre est incliné par rapport au plan de l'écliptique (plan dans lequel la terre se déplace autour du soleil).

La déclinaison est un angle qui permet de prendre en compte cette situation pour calculer la trajectoire apparente du soleil dans le ciel. Elle varie entre (23 ° 27 ') au solstice d'été à (- 23 ° 27 ') au solstice d'hiver, de manière sinusoïdale.

Les mouvements de la Terre autour de son axe et autour du Soleil sont schématisés sur la figure I.3. [6]

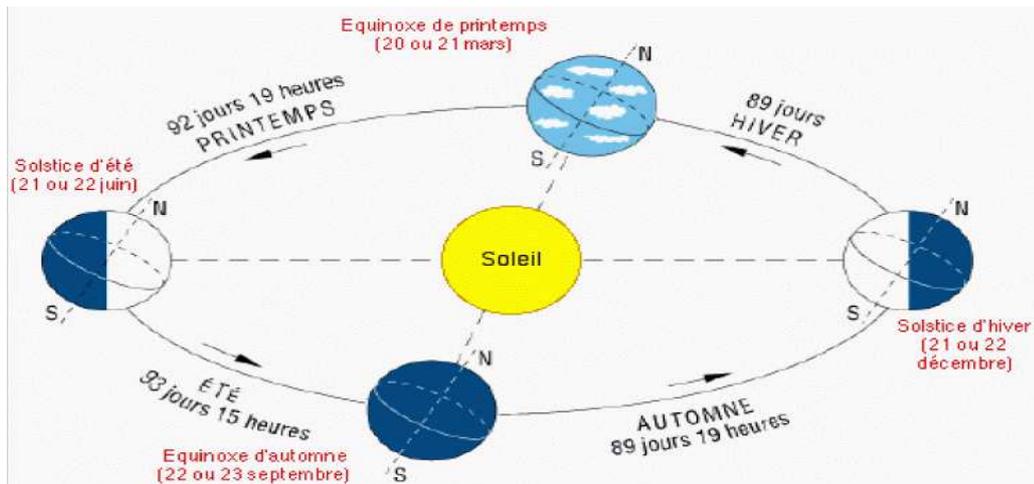


Figure I.3 : Schématisation des mouvements de la Terre autour du Soleil [7].

I.1.1.4 Evolution :

Pendant les cinquante premiers millions d'années de son existence, le soleil s'est contracté jusqu'à atteindre approximativement sa taille actuelle. L'énergie gravitationnelle libérée par ce mouvement a chauffé l'intérieur de l'astre et, lorsque le noyau s'est révélé suffisamment chaud, la contraction a cessé pour laisser place à la réaction de fusion thermonucléaire.

La durée de vie du soleil dépend de la quantité d'hydrogène qui reste à consommer, on estime qu'il existe depuis environ 4.5 milliards d'années, et subsistera, tel qu'il est, pendant au moins encore 5 milliards d'années [8].

Lorsque le soleil aura épuisé ses réserves d'hydrogène, il changera de structure. Sa surface externe s'étendra au-delà de l'orbite actuelle de la terre ou il se transformera en une géante rouge, légèrement plus froide en surface qu'actuellement, mais 10 000 fois plus brillante en raison de sa taille gigantesque. Le soleil demeurera une géante rouge, brûlant l'hélium dans son noyau, pendant un demi-milliard d'années seulement, après ce stade, le noyau résiduel du soleil s'effondrera pour former une étoile naine blanche petite de la taille de la terre environ, il se refroidira alors lentement pendant plusieurs milliards d'années.

La figure I.4 donne le cycle de vie du soleil.

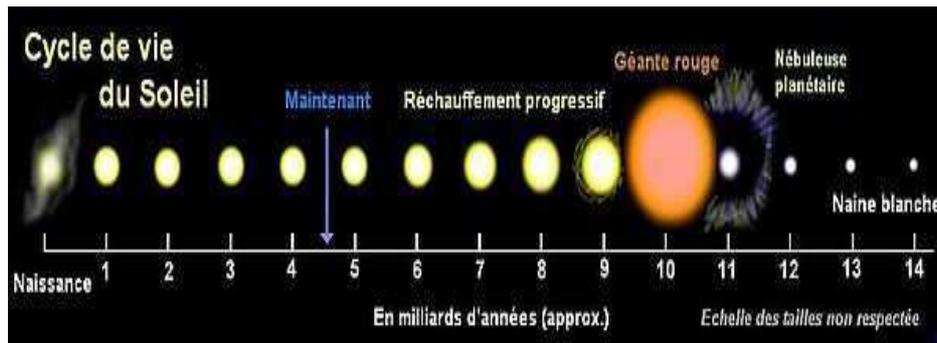


Figure I.4 : Cycle de vie du soleil [8].

I.1.2 L'énergie solaire :

L'énergie solaire est l'énergie que dégage le soleil sous forme de rayonnement, direct ou diffus. Sur terre l'énergie solaire est à l'origine du cycle de l'eau et du vent, le règne végétal dont dépend le règne animal, l'utilise également en la transformant en énergie chimique par la photosynthèse. Grâce aux diverses exécutions, elle peut être transformée en une autre forme d'énergie utile pour l'activité humaine, notamment en chaleur, en électricité ou en biomasse. Par extension, l'expression « énergie solaire » est souvent employée pour désigner l'électricité ou l'énergie thermique obtenue à partir du rayonnement solaire [9].

I.1.2.1 Origine :

Les conditions résidantes au cœur du soleil favorisent l'interaction des différents atomes d'hydrogène qui subissent une réaction de fusion thermonucléaire. Le résultat de ce processus, lorsqu'il se répète est la fusion de quatre noyaux d'hydrogène en un noyau d'hélium avec émission d'énergie sous forme de rayonnements gamma et X.

Chaque seconde, 564 millions de tonnes d'hydrogène se transforment en 560 millions de tonnes d'hélium, cette différence de 4 millions de tonnes par seconde correspond à la différence d'énergie de liaison entre les protons d'hydrogène et ceux d'hélium donnant une énergie sous forme de rayonnement, estimée à $3.7 \cdot 10^{26}$ j/s. [8]

I.1.2.1.1 Les avantages et inconvénients de l'énergie solaire [10]:

- **Les avantages :**
 - L'énergie solaire est inépuisable et non polluante.
 - L'énergie est propre et ne dégage pas de gaz à effet de serre.
 - L'énergie solaire thermique permet d'assurer une partie des besoins en eau chaude sanitaire et en chauffage.

- L'installation des panneaux solaires thermiques permet de réaliser des économies conséquentes.

- Les frais de maintenance et de fonctionnement d'une installation thermique sont relativement faibles.

• **Les inconvénients :**

- Le coût d'investissement d'une installation solaire thermique est relativement élevé.

- L'énergie solaire est une énergie intermittente. Il faut donc un système de chauffage d'appoint.

- La production d'énergie solaire n'est possible que lorsqu'il y a du soleil.

- Il faut pouvoir stocker la chaleur dans des ballons des dalles chauffantes.

- Les panneaux solaires contiennent des déchets toxiques : cuivre et chrome.

I.1.2.2 Captation :

Il existe différentes techniques pour capter une partie de cette énergie à savoir [8]:

• **L'énergie solaire thermique :**

Le thermique solaire est un procédé de transformation de l'énergie solaire en une forme thermique, qu'on peut utiliser :

✚ En usage direct de la chaleur : chauffe-eau solaire, chauffage solaire, cuisinière et séchoir solaire.

✚ En usage indirect où la chaleur sert pour un autre usage : centrales solaires thermodynamiques, froid solaire.

• **L'énergie solaire thermodynamique :**

L'énergie solaire thermodynamique utilise le solaire thermique pour produire de l'électricité selon le même principe qu'une centrale électrique classique mais en utilisant des centrales héliothermoélectriques [11].

Trois types principaux de centrales sont utilisés [12]:

✚ Les centrales à capteurs cylindro-paraboliques pour atteindre des températures entre 300 et 350 °C.

✚ Les centrales à capteurs paraboliques pour atteindre des températures de 1000°C ou plus.

✚ Les centrales à tour pour atteindre 1000 °C.

- **L'énergie solaire photovoltaïque :**

Elle permet de produire de l'électricité produite par transformation d'une partie du rayonnement solaire avec une cellule photovoltaïque [12].

Les photopiles utilisent l'effet photovoltaïque, elles sont formées d'une couche d'un matériau semi-conducteur et d'une jonction semi-conductrice. Le silicium est le plus employé ; cependant, l'arséniure de gallium offre des meilleures performances, mais reste beaucoup plus onéreux.

I.1.3 Les composantes d'un système de conversion thermique :

Tout système de conversion de l'énergie solaire doit comprendre les éléments suivants :

- Une surface de captation du rayonnement solaire.
- Un circuit caloporteur qui assure le transfert de l'énergie extraite du capteur à l'élément d'accumulation (stockage des calories), les fluides utilisés généralement comme fluide caloporteur sont : l'eau et l'air.
- Un stockage thermique.
- Un réseau de distribution [4].

I.1.4 Le rayonnement solaire :

L'énergie solaire qui arrive sur terre est disponible sous forme de rayonnement électromagnétique émis depuis le soleil. La puissance transmise par ce rayonnement varie avec la longueur d'onde du rayonnement. La plus grosse quantité d'énergie est apportée par les longueurs d'onde visibles (lumière blanche qui est la superposition de toutes les couleurs) [3].

Certaines longueurs d'onde sont absorbées partiellement ou totalement par les particules de l'atmosphère (les molécules d'ozone absorbent une partie des ultras violets).

Il en résulte que la puissance disponible sur un mètre carré normal au rayonnement est de l'ordre de 1000 W par temps ensoleillé alors qu'elle est de l'ordre de 1350 W hors atmosphère [4] (la figure I.5).

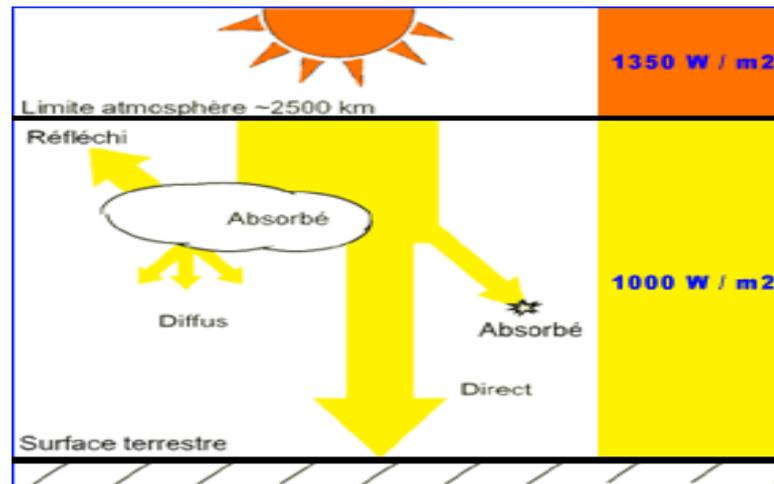


Figure I.5: Schéma du rayonnement solaire [3].

I.2 Le transfert thermique de la chaleur :

Introduction :

Les Transferts thermiques forment une discipline qui étudie la propagation de la chaleur. Le transfert de chaleur est en fait un échange de calories, toujours d'un milieu chaud à un milieu froid.

Il existe trois modes de transfert de chaleur [13]:

1. La conduction ;
2. La convection ;
3. Le rayonnement.

- **Conduction:** transfert de chaleur survenant dans un médium stationnaire sous l'effet d'un gradient de température (fluide ou solide);
- **Convection:** transfert de chaleur survenant dans un fluide en mouvement sous l'effet d'un gradient de température.
- **Rayonnement:** transfert de chaleur induit par l'échange d'ondes électromagnétiques entre un corps émetteur et un corps récepteur.

I.2.1 Conduction :

C'est un mode de transfert de chaleur au sein d'un milieu solide, sans déplacement de matière, sous l'influence d'une différence de température. La propagation de la chaleur par conduction à l'intérieur d'un corps s'effectue selon deux mécanismes distincts [13]:

- Une transmission par les vibrations des atomes ou molécules ;
- Une transmission par les électrons libres.

La figure I.6 montre l'échange de chaleur par conduction.

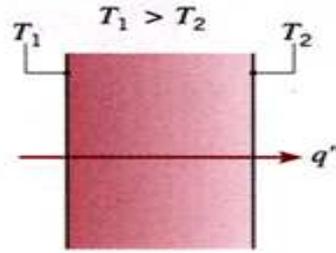


Figure I.6 : Echange de chaleur par conduction [13].

La théorie de la conduction repose sur l'hypothèse de Fourier :

I.2.1.1 Loi de Fourier :

Il existe une relation linéaire entre la densité de flux thermique et le gradient de température. En tout point d'un milieu isotrope, la densité de flux thermique instantanée est proportionnelle à la conductivité thermique λ du milieu, et au gradient de température [14].

$$\Phi = -\lambda \cdot \text{grad}(T) \quad (I.1)$$

Ou sous la forme suivante :

$$\Phi = -\lambda \cdot s \frac{\delta T}{\delta x} \quad (I.2)$$

Avec :

Φ : Flux de chaleur transmis par conduction (w).

λ : Conductivité thermique du milieu (w/m.°C).

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

s : Aire de la section de passage du flux de chaleur (m²)

Pour un milieu isotrope, la conductivité thermique λ est une grandeur scalaire positive, caractéristique du milieu, fonction en général de T . pour un milieu isotrope et homogène λ ne dépend pas de T . dans de nombreux cas pratiques, lorsque les écarts de température ne sont pas trop élevés, on peut considérer, avec une précision suffisante, λ comme une constante pour un milieu donné.

I.2.1.2 Résistance thermique :

Considérant l'intersection d'un tube de courant par deux surfaces isothermes de températures T_1 et T_2 , on définit la résistance thermique par la relation [13]:

$$T_1 - T_2 = R \cdot \Phi \quad (I.3)$$

On reconnaît dans cette équation la forme générale de la loi d'Ohm :

$$E_1 - E_2 = R \cdot I \quad (I.4)$$

Dans laquelle les potentiels E sont remplacés par les températures et l'intensité I par le flux Φ .

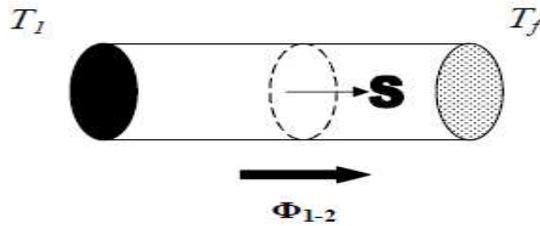


Figure I.7: Résistance thermique [13].

I.2.1.3 Equation générale de la chaleur :

Cette équation qui exprime la conservation d'énergie d'un élément infinitésimal de matière s'écrit [14]:

$$\overrightarrow{div}(\lambda \cdot \overrightarrow{grad}T) + P = \rho \cdot C_p (\partial T / \partial t) \quad (I.5)$$

Où :

P : représente la production de chaleur en w/m^3

Cp: chaleur massique en (J/kg.K),

ρ : masse volumique en (kg/m^3).

I.2.2 Convection :

C'est le transfert de chaleur entre un solide et un fluide, l'énergie étant transmise par déplacement du fluide. Ce mécanisme de transfert est régi par la loi de Newton [13,14].

$$\Phi = h \cdot S \cdot (T_p - T_\infty) \quad (I.6)$$

Avec :

Φ : Flux de chaleur transmis par convection (w)

h : Coefficient de transfert de chaleur par convection ($W/m^2 \text{ } ^\circ C$)

Tp : Température de surface du solide ($^\circ C$)

T_∞ : Température du fluide loin de la surface du solide ($^\circ C$)

S : Aire de la surface de contact solide/fluide (m^2)

La valeur du coefficient de transfert de chaleur par convection **h** est en fonction de la nature du fluide, de sa température, de sa vitesse et des caractéristiques géométriques de la surface de contact solide/fluide (La figure I.8).

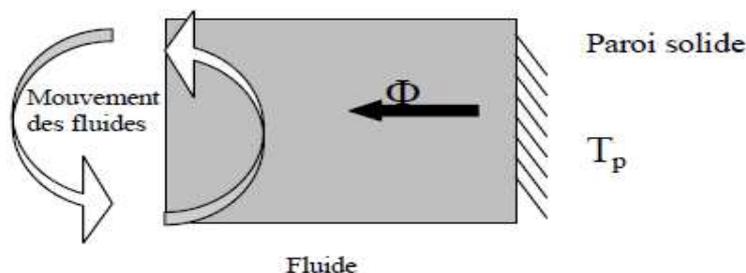


Figure I.8 : Transfert de chaleur par convection [13].

I.2.2.1 Nombres sans dimension :

Nous définirons ci-dessous les nombres sans dimension rencontrés en transfert thermique par convection [14]:

I.2.2.1.1 Nombre de Prandtl :

$$Pr = \frac{\mu \cdot C_p}{\lambda} = \frac{\nu}{a} \quad (1.7)$$

Avec :

λ : Conductivité thermique du milieu (w/m°C).

μ : viscosité dynamique en (PI).

C_p : chaleur massique en (J/kg.K).

Ce nombre représente le rapport de la diffusivité mécanique ν à la diffusivité thermique a .

Un fluide peu visqueux mais bon conducteur thermique, aura un Pr très faible et vice-versa.

I.2.2.1.2 Nombre de Nusselt :

$$Nu = \frac{h \cdot L}{\lambda_f} \quad (1.8)$$

Avec

L : dimension caractéristique (m)

Ce nombre exprime le rapport entre le flux de chaleur par convection dans le fluide et le flux par conduction, λ_f ici la conductivité du fluide. Contrairement au Pr , Nu dépend non seulement de la nature du fluide à travers λ_f , mais aussi de la géométrie de l'écoulement à travers la dimension caractéristique L et de champ de la vitesse dans la couche limite à travers sa dépendance sur h . Tout comme pour h , on définit un nombre de Nusselt moyen Nu et un nombre de Nusselt local.

$$Nu_l = \frac{h_l \cdot L}{\lambda_l} \quad (1.9)$$

I.2.2.1.3 Nombre de Grashof :

$$Gr = \frac{\beta \cdot g \cdot \rho^2 \cdot L^3 \cdot (T - T_f)}{\mu^2} \quad (1.10)$$

Ce nombre exprime le rapport entre les forces de gravité multipliées par les forces d'inertie et le carré des forces de viscosité.

I.2.2.1.4 Nombre de Rayleigh :

Il s'écrit sous la forme suivante :

$$Ra = Pr \cdot Gr = \frac{\beta \cdot g \cdot L^3 \cdot (T - T_f)}{a \cdot \nu} \quad (1.11)$$

Où il caractérise l'écoulement en convection naturelle.

Avec :

β : coefficient de dilatation du fluide (K^{-1}).

L : dimension caractéristique de la surface d'échange (m).

g : accélération de la pesanteur (m/s^2)

μ : viscosité dynamique du fluide ($kg/m.s$)

ν : viscosité cinématique (m^2/s)

ρ : masse volumique en (kg/m^3)

α : Diffusivité thermique en (m^2/s)

I.2.2.1.5 Nombre de Reynolds :

Est de la forme de :

$$Re = \frac{\rho \cdot u \cdot L}{\mu} = \frac{u \cdot L}{\nu} \quad (I.12)$$

Ce nombre exprime le rapport des forces d'inertie sur les forces de viscosité.

I.2.2.2 Flux de chaleur en convection forcée :

L'application de l'analyse dimensionnelle montre que la relation liant le flux de chaleur transféré par convection aux variables dont il dépend peut être recherchée sous la forme d'une relation entre trois nombres adimensionnels [13]:

$$Nu = f(Re, Pr) \quad (I.13)$$

Avec :

Nu : nombre de Nusselt, **Re** : nombre de Reynolds et **Pr** : nombre de Prandtl

Le calcul d'un flux de chaleur transmis par convection forcée s'effectue donc de la manière suivante :

1. Calcul des nombres adimensionnels de Reynolds et de Prandtl ;
2. Suivant la valeur de **Re** et la configuration → choix de la corrélation ;
3. Calcul de **Nu** par application de cette corrélation ;
4. Calcul de **h** (Coefficient de transfert de chaleur).

$$h = \lambda \cdot Nu \text{ Et de } \Phi = h \cdot S \cdot (T_p - T) \quad (I.14)$$

I.2.2.3 Le flux de chaleur en convection naturelle :

L'application de l'analyse dimensionnelle montre que la relation liant le flux de chaleur transféré par convection aux variables dont il dépend peut être recherchée sous la forme d'une relation entre trois nombres adimensionnels :

$$Nu = f(Gr, Pr) \quad (I.15)$$

Avec :

Nu : nombre de Nusselt, **Pr** : nombre de Prandtl et **Gr** : nombre de Grashof.

Le flux de chaleur transmise par convection naturelle s'effectue donc de la manière suivante:

1. Calcul des nombres adimensionnels de Grashof et de Prandtl ;
2. Suivant la valeur de **Gr** et la configuration → choix de la corrélation ;
3. Calcul de **Nu** par application de cette corrélation ;
4. Calcul de **h** (Coefficient de transfert de chaleur)

$$h = \lambda Nu/D \text{ et de } \Phi = h S (T_p - T) \quad (I.16)$$

I.2.3 Transfert de chaleur par rayonnement :

Contrairement aux deux autres modes d'échange qui sont la conduction et la convection, le rayonnement ne nécessite pas l'existence d'un support matériel. Il se propage dans l'espace, comme dans tout type de milieu. Si ce milieu est homogène, il se propage en ligne droite.

Le rayonnement c'est un transfert d'énergie électromagnétique entre deux surfaces (même dans l'espace) [15].

I.2.3.1 L'émittance (totale) :

C'est le flux total émis par unité de surface de la source. On considère globalement la puissance $d\Phi$ émise par un élément de surface dS dans l'ensemble des directions où il peut rayonner (hémisphère limitée par le plan tangent à dS en son centre), et on divise ce flux par l'aire de dS . L'émittance est notée par **M**. Son unité est le w/m² :

$$M = d\Phi/dS \quad (I.17)$$

I.2.3.2 Le corps noir :

C'est un corps idéal vis-à-vis du rayonnement qui, par définition, absorbe tout le rayonnement qu'il reçoit quelque soit la fréquence et la direction. A l'équilibre thermique, il émet autant de rayonnement qu'il en absorbe de sorte qu'un corps noir rayonne le maximum d'énergie de façon uniforme dans toutes les directions.

I.2.3.3 Loi du rayonnement thermique :

I.2.3.3.1 Loi de Planck : (émittance monochromatique du corps noir)

L'émittance monochromatique d'un corps noir $M_{\lambda,T}^\circ$ à la longueur d'onde λ et la température **T**, est donnée par la loi de Planck [16]:

$$M_{\lambda,T}^\circ = \frac{c_1 \lambda^{-5}}{\exp\left(\frac{c_2}{\lambda T}\right) - 1} \quad (I.18)$$

Où :

$M_{\lambda,T}^{\circ}$: est le flux énergétique émis par la surface dans tout l'hémisphère et ramène à l'unité de longueur d'onde λ , la surface étant à la température T. $M_{\lambda,T}^{\circ}$ est exprimé en w/m^3 ou, dans le cas où λ est exprimé en microns (μm), $M_{\lambda,T}^{\circ}$ sera en $w/(m^2 \cdot \mu m)$.

Les constantes c_1, c_2 sont égales à :

$$c_1 = 3,74.108 w \cdot \mu m^4 / m^2$$

$$c_2 = 1,44.104 \mu m^{\circ} k$$

I.2.3.3.2 Loi de Stefan Boltzmann :

Cette loi fournit l'émittance totale du rayonnement du corps noir dans l'espace en fonction de sa température absolue (sur tout le spectre de longueur d'onde). Elle s'écrit :

$$M^{\circ} = \sigma \cdot T^4 \quad (w/m^2) \quad (I.19)$$

Avec

σ : est la constante de Stefan Boltzmann

$$\sigma = 5,67.10^{-8} \quad (w/(m^2 \cdot k^4)).$$

I.2.3.4 Transfert par rayonnement entre surface [14]:

1) petit objet convexe placé dans une enceinte large ($S_1 \ll S_2$)

$$\Phi = \sigma \cdot \epsilon_p \cdot S \cdot (T_p^4 - T_{\infty}^4) \quad \text{Exprimé en (W)} \quad (I.20)$$

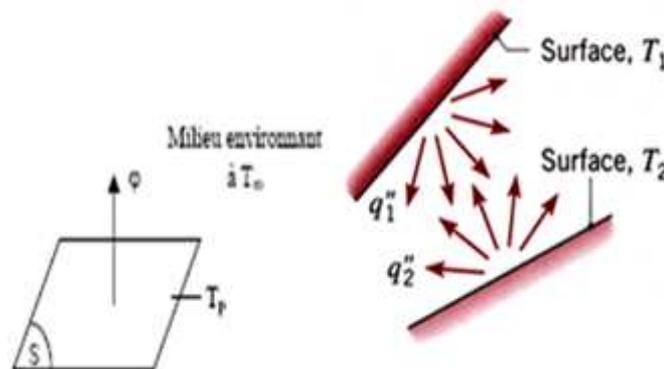


Figure I.9 : Transfert de chaleur par rayonnement [13].

2) Deux plans parallèles infinis :

$$\Phi = \frac{\sigma \cdot (T_1^4 - T_2^4)}{\frac{1}{\epsilon_1} + \frac{1}{\epsilon_2} - 1} \quad (I.21)$$

Avec :

Φ : Flux de chaleur transmis par rayonnement exprimé en (W).

σ : Constante de Stephan ($5,67.10^{-8} \quad (w/(m^2 \cdot k^4))$).

ϵ_p : Facteur d'émission de la surface.

T_p : Température de la surface en (K).

T_{∞} : Température du milieu environnant la surface en (K).

S : Aire de la surface en m^2 .

I.2.3.5 Réception du rayonnement par un solide :

Quand un rayon d'énergie incident Φ_i frappe un corps à la température T , une partie $\Phi_r \cdot \rho$ de l'énergie incidente est réfléctée par la surface S , une autre partie $\Phi_a \cdot \alpha$ est absorbée par le corps qui s'échauffe et le $\Phi_t \cdot \tau$ transmis et continue son chemin [13], la figure I.10 montre la réception du rayonnement par un corps solide:

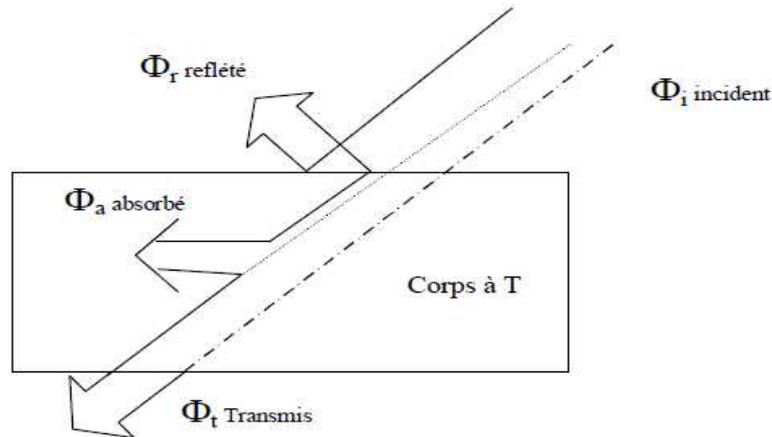


Figure I.10 : Réception du rayonnement [15].

On a évidemment : $\Phi_i = \Phi_r \cdot \rho + \Phi_a \cdot \alpha + \Phi_t \cdot \tau$ (I.22)

D'où : $\rho + \alpha + \tau = 1$.

I.2.4 Les différents modes de transferts thermiques dans un capteur solaire :

Un capteur solaire met en jeu simultanément les trois modes de transfert thermique, conduction, convection et rayonnement (figure I.11) [4].

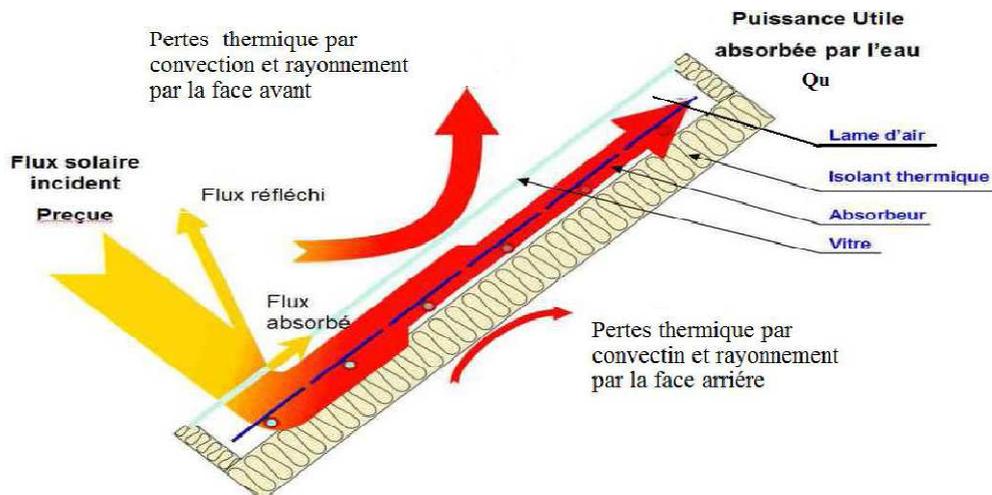


Figure I.11 : Les différents échanges thermiques dans un capteur plan vitré [14].

I.3 Le stockage thermique de la chaleur :

Introduction :

Le stockage est un moyen privilégié pour une gestion optimale de l'énergie thermique. Il permet en effet d'adapter la production aux besoins et de créer les conditions les plus favorables à cette gestion en réalisant une relation constante entre l'énergie demandée et l'énergie fournie. De plus, dans le bâtiment, il peut contribuer efficacement à améliorer le confort des occupants quand il est installé dans l'enveloppe (inertie des murs, dalles ...).

Parmi les applications usuelles on peut citer [15]:

- La gestion de l'énergie thermique produite dans les installations industrielles.

On réalise des systèmes qui récupèrent la chaleur perdue pendant la durée de fonctionnement de l'installation pour l'utiliser au moment et à l'endroit où on en a besoin.

- La gestion de l'électricité produite pendant les heures creuses.

L'énergie électrique produite pendant les heures creuses peut être transformée en énergie thermique pour alimenter les bâtiments ou les installations industrielles pendant les heures de pointes où le besoin d'énergie peut dépasser les capacités de production des centrales.

- La gestion de l'énergie frigorifique.

Le stockage de l'énergie et en particulier le stockage par la chaleur latente permet une réelle gestion de l'énergie frigorifique en fonction des besoins. En effet, en froid industriel et en climatisation, le procédé de production ne permet pas de grands écarts de la température d'exploitation, c'est ce qui rend quasi-impossible l'utilisation d'un stockage par chaleur sensible. L'énergie disponible est utilisée pour charger un stockage et l'énergie stockée sera utilisée dans les installations lors de pointes de consommation, quand la puissance appelée est supérieure à la puissance de la centrale comme dans le cas de la gestion de l'énergie électrique.

- Les systèmes solaires passifs :

Parmi les problèmes pratiques qui concernent les systèmes à énergie solaire, c'est le besoin d'un moyen efficace, avec lequel on peut stocker la chaleur pendant un jour ensoleillé pour l'utiliser pendant la nuit ou dans une autre période.

- Le refroidissement des circuits électroniques :

Le fonctionnement en transitoire des circuits électroniques nécessite généralement des puissances de refroidissement bien supérieures aux puissances nominales qui conduisent à surdimensionner les circuits, leurs alimentations et leur système de refroidissement.

L'utilisation d'un stockage d'énergie associé à ces circuits permet de faire face aux appels transitoires de puissance sans ce surdimensionnement.

- La gestion du confort thermique dans les bâtiments :

Le confort thermique est fonction non seulement de la température et de l'humidité de l'air ambiant mais encore des températures des parois. C'est une des raisons pour laquelle dans ce cas le stockage par chaleur latente est attractif.

Il y a deux techniques principales de Stockage Thermique :

Le stockage par la chaleur sensible (Stockage Thermique Sensible, STS) dans lequel la température des matériaux de stockage varie avec la quantité d'énergie stockée.

Le stockage par la chaleur latente (Stockage Thermique Latente, STL) qui utilise l'énergie emmagasinée ou restituée lorsqu'un corps change d'état (solide, liquide, gaz).

I.3.1 Le confort thermique :

Dans les milieux bâtis, le confort thermique constitue une exigence essentielle à laquelle le concepteur doit apporter les réponses nécessaires. L'environnement thermique est caractérisé par quatre grandeurs physiques (la température de l'air, l'intensité de rayonnement solaire, l'humidité et la vitesse de l'air). Ces variables réagissent avec l'activité et la vêtue du corps humain pour établir son état thermique et constituent ensemble les six paramètres de base des échanges thermiques entre l'homme et son environnement [17], (la figure I.12).



Figure I.12 : Pertes thermiques du corps humain et les paramètres dépendant [18].

I.3.1.1 Définition du confort thermique :

La définition du confort thermique est très complexe en raison de l'interaction de plusieurs variables environnementales et personnelles. Le maintien de l'équilibre thermique entre le corps humain et son environnement est l'une des principales exigences pour la santé, le bien-être et le confort [18]. Les conditions dans lesquelles on obtient cet équilibre est l'état du corps lorsqu'il atteint l'équilibre avec son environnement, dépendant de la conjugaison de nombreux facteurs. Certains de ces facteurs sont d'ordre personnel (l'activité physique, le niveau d'habillement, etc.) et d'autres sont des facteurs de l'environnement tels que la température de l'air, le rayonnement solaire, l'humidité relative et le mouvement de l'air.

Le confort thermique a été défini comme l'état satisfaction vis-à-vis de l'environnement thermique établi par échange thermique entre le corps et son environnement [17]. Le confort thermique dépend de contexte et des caractéristiques individuelles. Il conçu comme un processus adaptatif dynamique qui intègre les différents mécanismes physiques, physiologiques et psychologiques [19].

I.3.1.2 Paramètres du confort thermique :

C'est la sensation de bien être physique résultant de l'équilibre thermique du corps. Or le corps échange de la chaleur avec son environnement par convection, rayonnement et évaporation [17].

I.3.1.2.1 Température de l'air ambiant :

Hiver: la réglementation datant de 1973 fixe comme température de confort 19 °C au centre du local à 1.5 m de hauteur.

Été: en climat tempéré $\theta \leq 27$ à 28 °C. Ces températures peuvent être modulées en fonction de l'affectation du local et de l'heure de la journée [19].

I.3.1.2.2 Température des parois :

L'écart avec la température ambiante doit rester inférieur à 2 à 3 °C. Plus la paroi est froide, plus elle absorbe de rayonnement. Pour solutionner, on utilise par exemple des rideaux, des parois opaques isolées, des corps de chauffe en alliage ou bien des parois à doubles vitrages [18].

I.3.1.2.3 Température résultante :

Si pendant le temps t en seconde, le corps de surface S (les vêtements) échange avec son environnement une quantité de chaleur Q en joule (j), le flux de chaleur échangé est en Φ w et

$$\phi = \frac{Q}{t} \quad (1.23)$$

Si T_a est la température de l'air du milieu environnant, T_p des vêtements, on montre que le flux échangé simultanément par convection avec l'air ambiant et par rayonnement avec les parois environnantes, est

proportionnel avec les surfaces des vêtements (ou du corps) et à l'écart entre la température des vêtements et la température résultante externe T_r qui dépend à la fois de T_a et de T_p [18].

$$\dot{Q} = h \cdot (T - T_r) \quad T_r \approx 0.49T_a + 0.51T_p \quad (1.24)$$

h : est le coefficient global d'échange.

T_r : appelée aussi température résultante de confort est souvent approchée à la moyenne arithmétique de T_a et T_p .

$$T_r \approx \frac{T_a + T_p}{2} \quad (1.25)$$

I.3.1.2.4 Homogénéité des températures d'un local :

Horizontalement: 2 à 3 °C maximum d'écart toléré d'un point à un autre.

Verticalement: écart maximum de 3 °C entre la tête et les chevilles.

I.3.1.2.5 Vitesse de circulation de l'air :

Elle doit rester comprise entre environ 0.1 et 0.2 m/s (ne jamais dépasser 0.5, m/s), car l'échange thermique augmente si la vitesse de l'air augmente. Les objectifs de l'installation de chauffage ou de climatisation d'un local sont de réaliser le confort thermique des occupants de ce local quel que soient les conditions climatiques extérieures, tout en respectant des impératifs d'économie d'énergie [19].

I.3.2 Eléments de conception bioclimatique :

La conception bioclimatique s'est beaucoup développée depuis les années 70, et a donné lieu à de nombreuses recherches qui ont permis de produire des outils de conception bioclimatiques, aussi bien pour les architectes, les bureaux d'étude, que les ingénieurs. Un rappel de l'état de l'art sur la modélisation et la conception est effectué selon deux axes: le solaire passif et la ventilation naturelle. En effet, un composant solaire se doit de compléter une architecture éventuellement bioclimatique, et non pas concurrencer celle-ci au risque de faire diminuer sensiblement l'efficacité de l'une des ces deux techniques. Par exemple, on peut imaginer que l'intégration d'un capteur à air peut s'avérer inutile pour un bâtiment bioclimatique s'il y a une mauvaise adéquation entre les besoins de chauffage et la production du capteur à air [20].

I.3.2.1 Le stockage géothermique :

Les systèmes géothermiques sont des technologies clés pour la fourniture et l'équilibre entre l'offre et la demande d'énergie dans les villes intelligentes [21]:

A) L'énergie géothermique : est une source d'énergie renouvelable qui peut fournir de la chaleur et/ou de l'électricité à tout moment et n'importe où. La géothermie est une technologie adaptée pour produire de l'électricité avec un facteur de charge très élevée (> 80%), contribuant à équilibrer le réseau électrique lorsqu'elle est combinée avec les

technologies intermittentes (dépendantes des conditions climatiques). Le secteur de la géothermie est convaincue de pouvoir contribuer aux réseaux d'électricité intelligents, mais également à la production de chaleur et/ou de froid par l'utilisation de pompes à chaleur géothermiques notamment.

B) Par ailleurs, dans les villes intelligentes, le réseau électrique se combine avec les réseaux de chaud et/ou de froid: ici aussi, la géothermie est une bonne solution en fournissant à la fois le chauffage et le refroidissement ; c'est également une technologie permettant le stockage, en particulier avec le stockage thermique souterrain (à la fois en basse et haute températures et à faible ou grande profondeur). L'énergie géothermique peut alors fournir chauffage et refroidissement pour les réseaux urbains, les petits et grands bâtiments, et quelques autres applications basses et moyennes températures.

Regeocities est dédié aux systèmes géothermiques peu profonds pour les villes.

✚ **Pompes à chaleur géothermiques:**

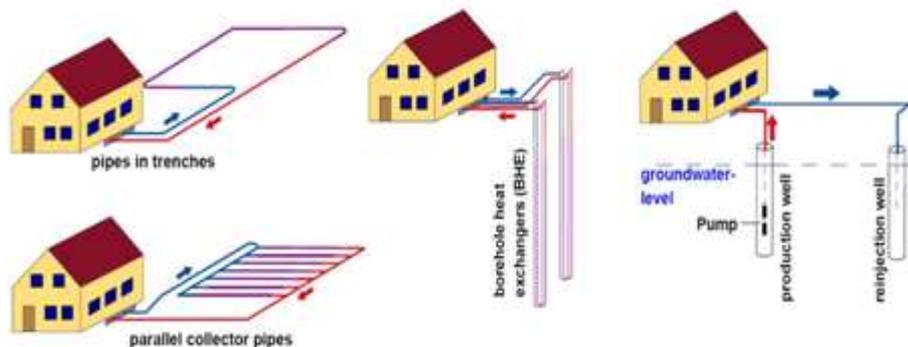


Figure I.13: Différents types des pompes à chaleur géothermiques [21].

✚ **Stockage souterrain d'énergie:**



Figure I.14: Stockage souterrain d'énergie [21].

I.3.2.1.1 Le fonctionnement des systèmes Géothermique à Très Basse Température :

a) Eléments de la GTBT et schéma de principe :

Les systèmes géothermiques à très basses température sont constitués de trois éléments principaux [21]:

- La boucle d'échangeurs géothermiques ou les nappes souterraines (capteurs horizontaux, capteurs verticaux, pieux ou corbeilles).
- La pompe à chaleur.
- Le système de distribution de la chaleur (plancher chauffant, ventilo-convecteurs, etc....) ou de distribution eau chaude sanitaire.

Une présentation détaillée de chacun des éléments est réalisée sur la figure I.15.

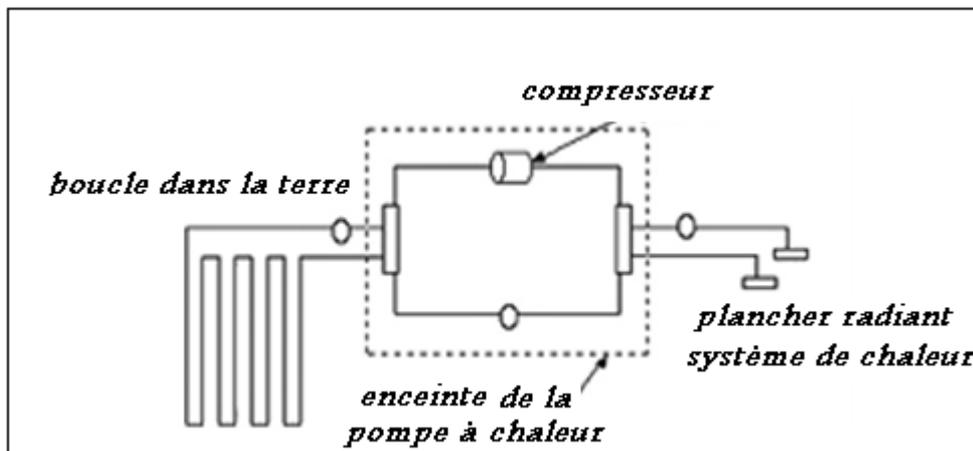


Figure I.15: Les différents éléments de la GTBT [21].

b) Types d'utilisation de l'énergie :

Il existe trois voies différentes d'utilisation de l'énergie produite par les systèmes géothermiques : le chauffage, l'eau chaude sanitaire et le rafraîchissement des bâtiments.

- **Chauffage** : Principal mode de fonctionnement de la GTBT, il est basé sur la connexion entre une pompe chaleur et un système de distribution de chaleur (plancher chauffant, ventilo-convecteur etc....).

- **Eau chaude sanitaire (ECS)** : Il est possible de récupérer une partie de la chaleur utilisée pour le chauffage afin de préchauffer ou chauffer de l'eau chaude sanitaire. Toutefois, sans fonctionnement du système de chauffage, le chauffage ou préchauffage de l'ECS n'est pas envisageable. Une autre possibilité est l'utilisation de « chauffe-eau

thermodynamique » autonomes, permettant de fournir de l'eau chaude sanitaire toute l'année.

- **Rafrâichissement** : Le rafraichissement des bâtiments à l'aide d'installation GTBT peut se faire soit de façon directe, soit en utilisant le mode réversible de la pompe à chaleur ou de la thermofrigopompe. Le rafraichissement direct ou " natural cooling " ou " free cooling " est basé sur le passage de l'eau d'une nappe phréatique ou de l'eau glycolée dans un échangeur.

c) Modes de fonctionnement des installations de GTBT :

Il existe différents mode de fonctionnement des installations de GTBT : le système peut fonctionner de façon passive ou naturelle, de façon active ou de façon saisonnière. La sélection s'effectue en fonction de la nature géologique et hydrologique du sol. Dans tous les cas, il est nécessaire de vérifier que la recharge du sol soit suffisante sous peine d'un mauvais fonctionnement de l'installation GTBT (appauvrissement jusque gel du sol / gonflement ...).

- **Recharge naturelle :**

La recharge naturelle ou passive ne nécessite aucune intervention externe. C'est le cas notamment des configurations où l'écoulement de l'eau est suffisant pour permettre une recharge thermique du sol.

- **Recharge active :**

Dans le cas d'une recharge naturelle non suffisante, il est nécessaire de faire en sorte que celle-ci s'effectue réellement afin d'éviter la dégradation thermique du terrain. Les risques encourus sont un bilan énergétique déficitaire ou excédentaire. La solution envisageable dans ce cas est une installation combinée permettant le rafraichissement et le chauffage ou utilisant une recharge par d'autres sources d'énergie (solaire, rejets thermiques, etc....)

- **Stockage saisonnier :**

Le stockage saisonnier permet une recharge active du sol, mais dans ce cas on cherche en plus de respect de l'équilibre thermique, on cherche à minimiser la part des énergies fossiles. Le sous-sol possède de manière générale de très bonnes propriétés de stockage de la chaleur. Sa chaleur spécifique volumique est de 0,42 à 0,78 kWh.m⁻³.K⁻¹ et sa conductivité thermique s'étend de 1 à 3 W.m⁻¹.K⁻¹.

Avec l'aide de capteurs solaires par exemple, de la chaleur issue du rayonnement solaire est stockée dans le sol en recourant à des champs

de sondes géothermiques. L'accumulateur de chaleur est constitué de tubes verticaux, soit montés dans des forages, soit battus directement dans le sol, le stockage peut alors être saisonnier (Figure I.16). Le cycle périodique de charge et de décharge permet l'exploitation combinée des stocks souterrains pour le chauffage et la climatisation.

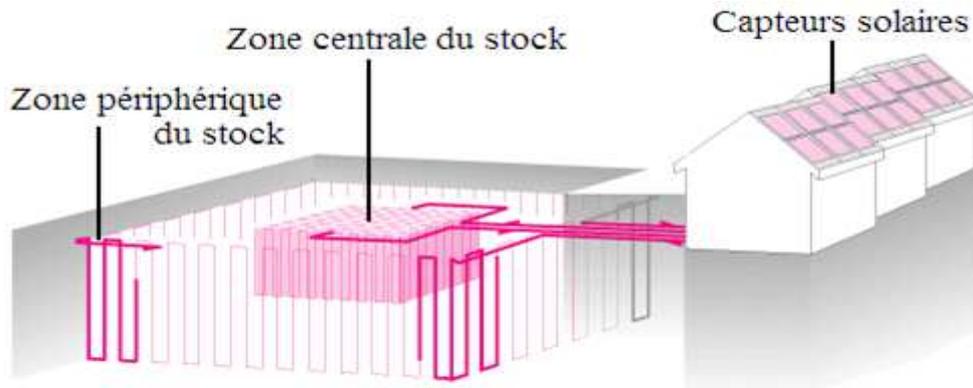


Figure I.16 : Stock souterrain saisonnier [21].

Une autre possibilité est un mode de fonctionnement différent entre l'hiver et l'été.

En hiver, de la chaleur est prélevée du stock souterrain et utilisée à des fins de chauffage soit en recourant à une pompe à chaleur soit directement.

En été, on exploite les températures relativement basses du stock souterrain pour la climatisation, permettant ainsi de le recharger. Le capteur solaire thermique assure dans ce cas le préchauffage de l'eau chaude sanitaire et la régénération thermique du stock par utilisation de l'énergie solaire excédentaire. Finalement le couplage permet le maintien des performances énergétiques du système sans risque de déplétion thermique.

I.3.3 Le stockage Murs capteurs, Murs Trombe :

L'utilisation passive de l'énergie solaire est un thème qui a été très étudié. Cette technique permet de faire diminuer les besoins de chauffage (en climat tempéré ou froid). Quelques règles techniques architecturalement assez simples ont été élaborées.

Une règle importante (en considérant au préalable que le bâtiment est orienté au Sud) consiste à mettre plus de vitrage sur la façade sud que sur la façade Nord du bâtiment, avec du vitrage à faibles pertes thermiques ($U < 2 \text{ w/m}^2\cdot\text{K}^{-1}$). Il est également souvent plus avantageux de concevoir un bâtiment avec plus de vitrage sur la façade Est que sur la façade Ouest pour limiter les surchauffes de l'été. De même, pour éviter un apport de gain solaire trop important l'été par le vitrage de la

façade sud, il faut installer des brises soleil opaques au-dessus de ces vitrages afin de laisser passer le soleil l'hiver et de protéger les vitrages l'été. Rappelons également qu'une des règles indissociables de la conception bioclimatique est de prévoir une isolation thermique suffisante pour avoir de faibles besoins de chauffage, par l'extérieur des parois si l'on veut profiter de l'inertie de l'enveloppe du bâtiment [22], (la figure I.17).

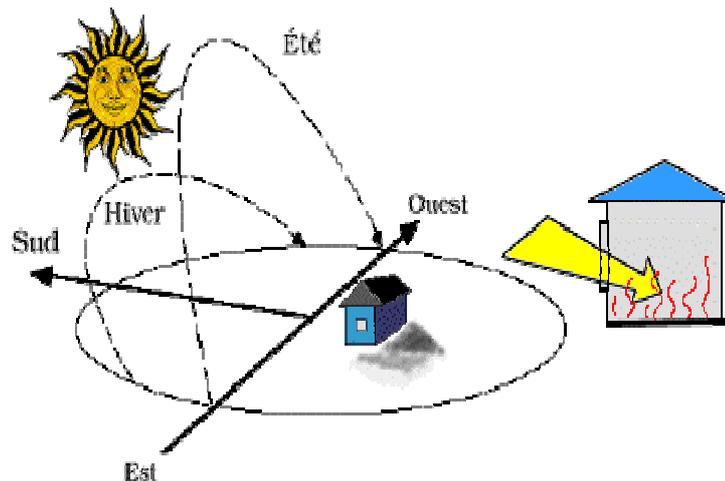


Figure I.17 : l'orientation du bâtiment [11].

Ces deux systèmes permettent de valoriser le rayonnement solaire en associant deux propriétés physiques :

- a) L'effet de serre à travers le vitrage.
- b) L'inertie du mur.

I.3.3.1 Principe du mur capteur :

Le rayonnement solaire est valorisé par effet de serre, en disposant un vitrage devant un mur en béton. L'énergie solaire est transmise par conduction à travers le mur puis par rayonnement à l'air de la pouvant atteindre 11 heures si l'épaisseur du béton de 40cm. Ce déphasage permet de chauffer la pièce au moment où il n'y a plus de soleil.

En raison des pertes, le mur capteur ne restitue pas la nuit toute l'énergie reçue durant la journée. Afin de limiter ces pertes, il faut prévoir une isolation nocturne ou mettre en œuvre un double vitrage [23], une présentation détaillée de principe du mur capteur est réalisée sur la figure I.18.

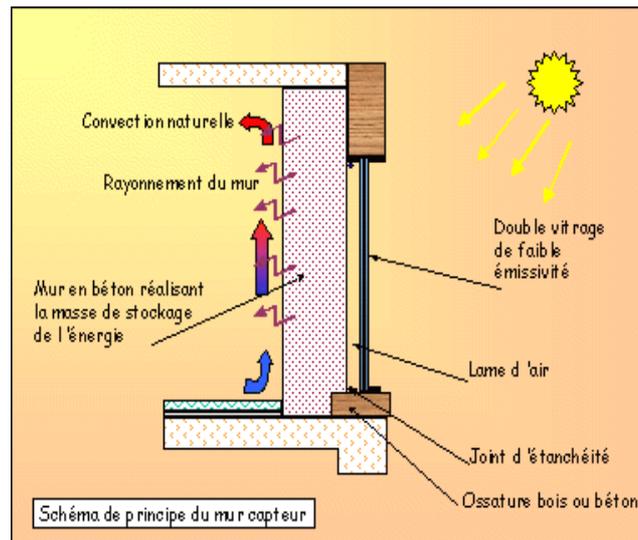


Figure I.18: Schéma de principe du mur capteur [23].

Pour favoriser l'absorption de la chaleur, on applique une peinture sombre sur la surface extérieure du mur, marron par exemple.

I.3.3.2 Principe du mur trombe :

Il s'agit d'un vitrage suivi d'une lame d'air et d'un mur en béton. Des ouvertures hautes et basses sont réalisées dans le mur afin de créer une circulation d'air par thermosiphon entre la lame d'air et l'air du local à chauffer, la figure I.19 montre leur principe.

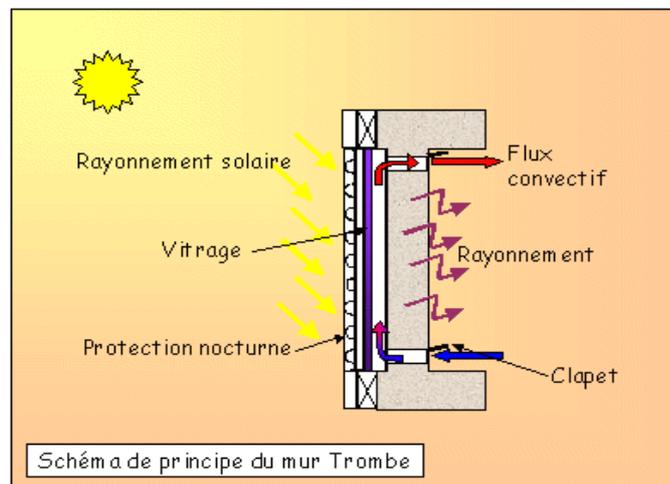


Figure I.19: Schéma de principe du mur Trombe [23].

L'air chauffé dans la lame d'air pénètre par les ouvertures supérieures dans la pièce. Il se refroidit au contact de l'air du local et, une fois rafraîchi, revient par les ouvertures inférieures dans la lame d'air [23].

En l'absence de rayonnement solaire, le flux convectif s'inverse pouvant provoquer un refroidissement accéléré de la pièce. Pour éviter

cela, il est alors nécessaire de disposer des clapets à fermeture manuelle ou automatique.

I.3.3.3 Comparaison :

Tableau I.2: « la comparaison entre le mur capteur et mur Trombe [22]».

| | Le mur capteur | Le mur Trombe |
|---------------------------------|--|---|
| Transfert thermique | Transmission de la chaleur avec un déphasage fonction de l'épaisseur du Mur. | Transmission directe : environ un tiers de l'énergie totalement restituée ; Restituée du reste de l'énergie déphasée. |
| Valorisation des apports | Valorisation des apports directs, s'il est associé à un vitrage simple (Mur capteur en allège et vitrage au dessus). | Valorisation des apports directs et des apports déphasés. |
| Coût | Comparable à celui d'un mur classique. | Coût plus élevé, pas de fabricants de systèmes : les ouvertures doivent être faites sur mesure par le menuisier sur chaque chantier. Mise en œuvre plus compliquée et plus chère. |
| Maintenance | Quasi inexistante. | Gestion quotidienne des clapets. Possibilité d'ouverture et de fermeture automatique. |

I.3.4 Isolation thermique :

L'isolation thermique a un triple but, répond aux besoins [24]:

- Diminuer le coût du chauffage : les pertes de chaleur d'une maison sans isolation sont nombreuses et importantes suivant les endroits. Il en résulte que plus votre isolation sera performante, moins élevée sera votre note de chauffage.

- Augmenter votre confort: le niveau de confort thermique d'une habitation est déterminé par la température de surface des parois et la température de l'air.

- Protéger votre patrimoine: une meilleure isolation protège en effet d'une part votre habitation, neuve ou existante, contre les effets pervers des chocs thermiques successifs; et d'autre part, votre environnement grâce à la limitation de consommation d'énergie ainsi permise.

Un mur en pierre, même plus de 80 cm d'épaisseur, n'empêche nullement la chaleur de s'échapper vers l'extérieur. Il faut donc isoler votre habitation soigneusement, en commençant par le toit s'il est la première source de déperditions, puis les murs, et enfin les planchers si ceux-ci donnent sur une cave ou un vide sanitaire.

Améliorer le confort thermique d'hivers passe par un diagnostic des bâtiments et des installations de chauffage. Des spécialistes (architectes, entreprises, bureaux d'études) sont susceptibles d'effectuer ces diagnostics et de préconiser des solutions. Quelques réflexes permettant d'orienter les choix parmi les mesures proposées [23]:

- Commencer par isoler les combles (s'ils existent) avant les parois verticales en maison individuelle (la majeure partie des pertes de chaleur se fait par le toit),

- Isoler les murs en contact avec l'extérieur (résultat qui peut être obtenu soit en plaçant un matériau isolant à l'intérieur ou à l'extérieur du logement).

- Veiller à maintenir ou à rétablir la circulation d'air dans le logement en cas de changement de fenêtres (il ne suffit pas que les nouvelles fenêtres présentent des entrées d'air, il faut aussi que l'air puisse ressortir du logement),

- Remplacer des simples vitrages par des doubles vitrages,

- Mettre en place une régulation du système de chauffage,

- Examiner les possibilités de changement de mode de chauffage ou d'énergie utilisée.

Les moyens les plus employés pour se protéger de la chaleur estivale sont :

- La ventilation par ouverture des fenêtres lorsque cela est possible (zone peu bruyante, pas de risque d'intrusion),

- La mise à profit de l'inertie thermique du bâtiment, c'est-à-dire profité de la capacité que le bâtiment a le pouvoir de stocker la fraîcheur de la nuit pour limiter l'élévation de la température le jour. Pour un bâtiment existant, l'inertie peut être augmentée par la pose d'une isolation thermique par l'extérieure.

- La limitation des apports solaires à travers les ouvertures (portes et fenêtres), à l'aide de volets ou de stores.

I.3.5 Les déperditions thermiques d'une maison:

Dans un bâtiment mal isolé, les déperditions thermiques sont importantes et engendrent des consommations d'énergie importantes pour le chauffage des pièces et de l'eau chaude sanitaire en hiver voire le recours à la climatisation en été. En plus des économies énergétiques directes, l'isolation thermique alliée à une bonne ventilation réduit les coûts d'entretien et les risques d'humidité et augmente la durée de vie de la maison [24].

Le schéma suivant présente en pourcentages indicatifs les pertes de chaleur d'une maison traditionnelle non isolée.

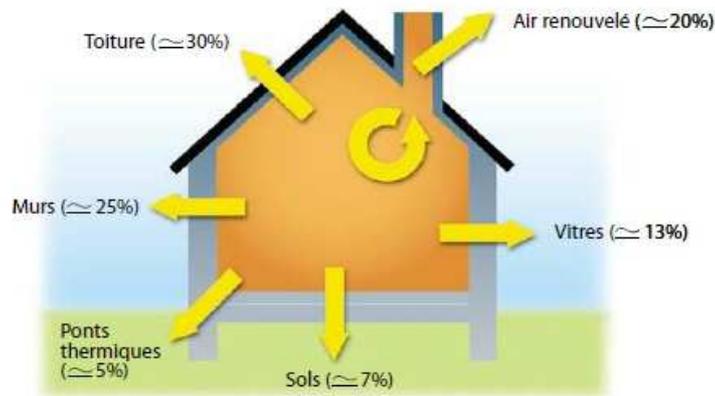


Figure I.20 : Ensemble des déperditions thermiques d'une maison non isolée [19].

Conclusion :

Dans cette partie, on a présenté un récapitulatif de quelques notions de bases relatives au gisement solaire, qui nous permis par la suite d'exploiter l'énergie solaire pour le chauffage et la climatisation par voie solaire.

L'utilisation de l'énergie solaire thermique redevient d'actualité grâce à son formidable impact sur la réduction des émissions de CO₂ et à des installations performantes.

Ainsi pour les installations collectives, la mise en œuvre de la garantie de résultats solaires est une donnée incontournable.

Pour exploiter ou stocker cette énergie solaire il faut la convertir en une autre forme d'énergie, pour cela on utilise les capteurs solaires.

On retiendra que lorsque deux corps sont à des températures différentes, il y a transfert thermique d'énergie du plus chaud vers le plus froid. On distingue trois modes de transfert thermique chacun régi par des lois bien spécifiques : la conduction, la convection et le rayonnement.

A decorative frame with rounded corners and a light beige border. Inside the frame, a purple lily flower is positioned in the upper right corner, with a hummingbird hovering above it. At the bottom, there is a light blue ribbon and another purple lily flower, with pink and red swirling vine-like patterns extending across the bottom edge.

Chapitre II

***Etude théorique
d'un capteur plan
à air***

Introduction :

Les capteurs plans à air sont les éléments chargés de capter l'énergie solaire (radiante) en la transformant en énergie thermique. Il joue aussi le rôle d'échangeur en cédant cette énergie captée au fluide colporteur (air) qui les traverse. Les usages sont multiples ; à savoir ; le chauffage des locaux, le séchage, etc.

Leur conception est orientée selon l'efficacité recherchée, leurs destinations et les coûts engendrés par l'installation. Plusieurs modèles ont été construites et étudiés afin de cerner les différents paramètres qui les caractérisent en vue de dégager une normalisation qui peut être standardisée par la suite.

II.1 Description d'un capteur solaire plan à Air :

II.1.1 Définition d'un capteur solaire plan à Air :

Les capteurs solaires plans offrent des solutions pratiques, rentables, pour répondre aux besoins des systèmes de chauffage solaire actifs.

L'avantage de ces capteurs c'est qu'ils peuvent être intégrés aux toitures, aux murs des maisons en étant posés sur des supports conçus pour cela ou faisant partis de la structure du bâtiment.

L'installation des capteurs sur le toit d'un bâtiment permet de réduire les pertes entre les capteurs, le stockage et l'espace à chauffer, et d'éviter l'ombre des maisons et des arbres environnants.

En général, ils sont fixes à cause du cout et de l'entretien qu'exigent les éléments mobiles.

Ils sont orientés plein sud, avec une inclinaison voisinant 45 degrés de façon à obtenir un gain de chaleur maximum surtout en période hivernale [25].

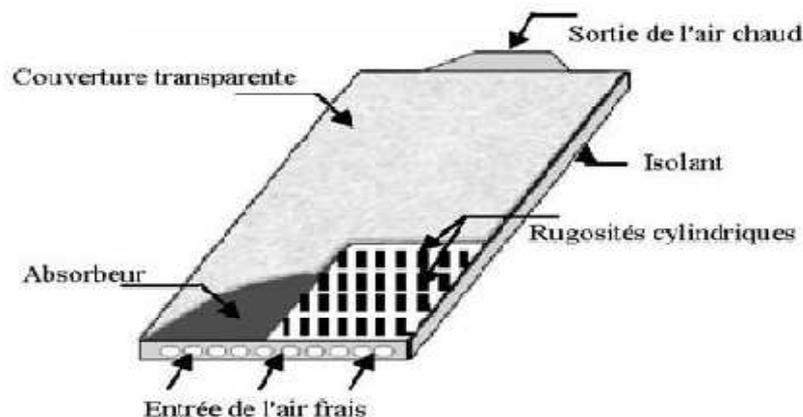


Figure II.1 : Capteur plan à air [4].

II.1.2 Principe de fonctionnement :

Consiste à emprisonner l'énergie apportée par le rayonnement solaire avec le minimum de pertes.

Un flux solaire traverse la couverture transparente et vient chauffer l'absorbeur derrière cette vitre, il se trouve donc piégé puisque le rayonnement émis par ce corps ne peut traverser la vitre. La chaleur est donc bloquée entre l'absorbeur et la couverture : c'est l'effet de serre [4].

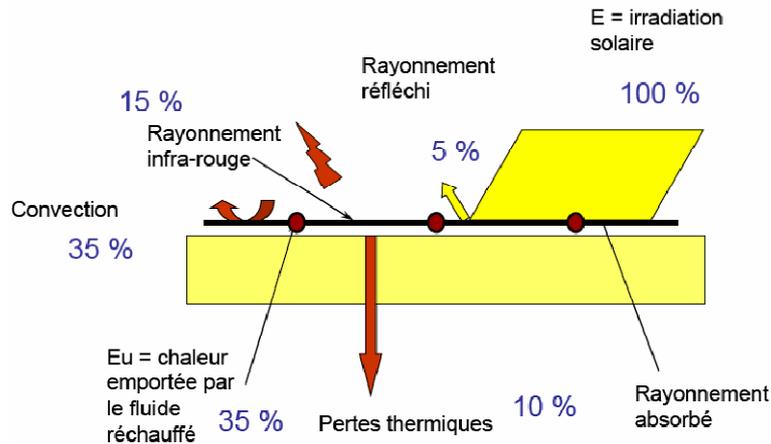


Figure II.2 : Principe de fonctionnement des capteurs solaires non vitrés à revêtement sélectif [1].

II.1.2.1 L'effet de serre :

L'effet de serre est un effet souvent mis à profit pour la conversion thermique à basse température du rayonnement solaire ou désigné par « effet de serre ». L'ensemble des modifications apportées à l'équilibre énergétique et thermique d'un corps récepteur (sol. Par exemple). Par la mise en place d'un couvercle de verre, transparent au rayonnement solaire et opaque au rayonnement terrestre. La présence de la vitre a pour effet d'absorber totalement le rayonnement émis par le récepteur et d'être le siège d'une émission par ses deux faces, en fonction de sa température propre [8]. L'effet de serre est généralement associé à la seule notion de modification des échanges radiatifs entre le récepteur et l'atmosphère, bien que son efficacité vis-à-vis des pertes par convection soit le plus souvent comparable. Il n'accroît aucunement l'énergie solaire disponible sur le récepteur, au contraire, celle-ci diminue. Le principal résultat de l'effet de serre est d'accroître la température limite d'équilibre du récepteur. L'effet de serre d'un vitrage apparaît ainsi comme particulièrement utile chaque fois que les échanges.

Par rayonnements prévalent sur les autres pertes, c'est-à-dire lorsque des températures relativement élevées sont recherchées au récepteur.

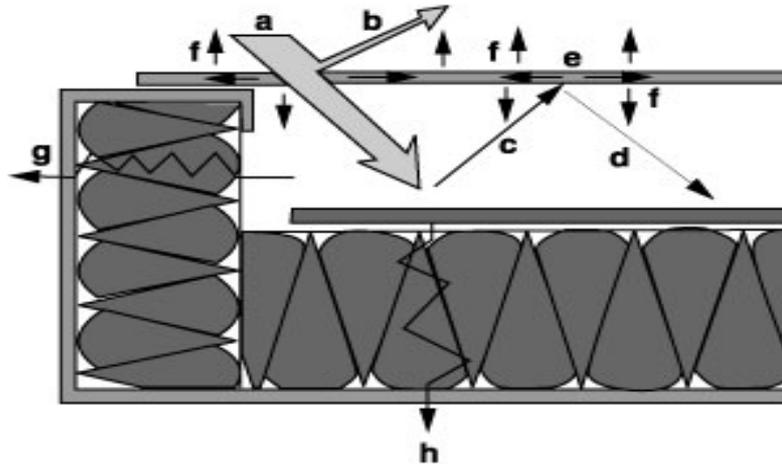


Figure II.3 : Schéma montrant le principe de l'effet de serre [8].

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.1.3 Les principaux éléments du capteur solaire plan à air :

Un capteur est constitué constituée de trois parties principales [4]:

🔧 Partie avant :

C'est la couverture transparente constituée du verre ou du plastique et qui peut être simple, doublée ou triplée. Cette couverture doit assurer trois fonctions essentielles :

- Recevoir le maximum du rayonnement incident sans réflexion ni diffusion importante.
- Transmettre la plus part du rayonnement reçu.
- S'opposer aux déperditions thermiques par convection et rayonnement.

🔧 Partie absorbante :

C'est au niveau de laquelle s'effectue la conversion thermique, et qui doit assurer les fonctions suivantes :

- Absorber la plus grande partie du rayonnement incident.

- Transmettre la chaleur produite par cette absorption vers le fluide caloporteur.
 - N'accepter que le minimum d'échanges thermiques vers l'extérieur pour rendre efficace cette partie.

Partie arrière :

Elle est généralement constituée d'une couche isolante, qui diminue les pertes par convection et ralentit ainsi le refroidissement de la face opposée au rayonnement solaire. Le choix du matériau à utiliser dépend de :

- Sa résistance aux températures de fonctionnement.
- La permanence de ces caractéristiques dans le temps (conductivité thermique).
- La résistance aux chocs, à l'humidité, au feu, à l'eau de pluie...etc.

II.1.4 Le rôle de chaque composante :

II.1.4.1 La couverture transparente :

La couverture a un rôle de protecteur mécanique de l'absorbeur. Sa fonction est de réduire les pertes thermiques vers l'extérieur [8].

Elle intervient au niveau [25]:

- Des échanges convectifs, qui dépendent aussi de l'espace entre absorbeur et la couverture, qui constitue la veine d'air immobile, d'une hauteur comprise entre 15 et 40mm.
- Des échanges radiatifs (bonne transparence aux rayons solaires et opaque aux infrarouges).
- elle doit, résister aux chocs, présenter un faible coefficient de distillation et de flexibilité.

Si on élimine tous les facteurs, on obtient un produit de qualité qui permet de contribuer à l'amélioration du rendement du capteur solaire, surtout en période hivernale avec des rayonnements intermittents. Dans certains cas, la plupart des oxydes de fer sont éliminés, ces verres transmettent jusqu'à 94% du flux solaire [25].

L'utilisation du double vitrage permet de réduire les pertes thermiques par rayonnement et convection, mais on note une réduction allant jusqu'à 15% du flux solaire. Le bilan thermique demeure favorable dans le cas des systèmes de moyennes et hautes températures, par contre pour basses températures, les procédés à simple vitrage sont plus favorables.

Dans ce cadre, «Bourhaleb.H» (1987) [25]. A été fait une étude expérimentale sur des capteurs double vitre et une seule vitre et il a trouvé que ce facteur influe fortement sur l'efficacité du capteur.

S.Youcef-Ali (2005) [26], a montré dans une étude expérimentale que la couverture triple donne des performances plus importantes que celle à double vitre grâce a la minimisation des pertes vers l'extérieur.

- **Polycarbonate :**

Le polycarbonate double vitrage, d'un prix élevé, permet de réduire d'une façon importante les pertes thermiques (face avant), mais diminue sensiblement la transmission du rayonnement solaire surtout lorsque l'angle d'incidence est supérieur à 45 degrés [25].

Tableau II.1 : « Propriétés de quelques surfaces transparentes au rayonnement solaire mais opaques au rayonnement infrarouge [5]».

| Matériau | Facteur de transmission solaire (%) | Masse volumique (kg/m ³) | Chaleur massique (J/kg.K) | Conductivité thermique (W/mK) | Dilatation thermique (K ⁻¹) |
|------------------------------|-------------------------------------|--------------------------------------|---------------------------|-------------------------------|---|
| Verre | 85-92 | 2700 | 840 | 0.93 | 0,9 . 10 ⁻⁵ |
| Polycarbonate | 82-89 | 1200 | 1260 | 0,2 | 6,6 . 10 ⁻⁵ |
| Polyméthacrylate | 89-92 | 1200 | 1460 | 0,2 | 7 . 10 ⁻⁵ |
| Polyester armé | 77-90 | 1400 | 1050 | 0 ,21 | 3,5 . 10 ⁻⁵ |
| Polytéréphtalate éthylène | 84 | 1,38 | 1170 | 0,25 | 7 . 10 ⁻⁵ |
| Polyfluoro-éthylène opoylène | 97 | 2,15 | 1170 | 0,25 | 10 ⁻⁴ |
| Polyflurure vinyle | 93 | 1,50 | 1380 | 0,12 | 4 . 10 ⁻⁵ |

Les inconvénients du verre sont sa fragilité, son poids et son prix élevé en double vitrage. [5]

L'inconvénient principal des matériaux plastiques est la dégradation de certaines de leurs propriétés avec le temps pour certains, ou le prix élevé pour d'autres [25].

Donation Njomo (1998) [27], a souligné d'après une étude numérique, qu'un capteur avec double couverture de matière différente (ici la couverture extérieure est en pléxiglace et celle intérieure est en verre) a des performances meilleures qu'un capteur a deux vitres de même matière.

II.1.4.2 L'absorbeur :

L'absorbeur est l'élément essentiel dans un capteur solaire, car il doit absorber le plus grande partie du rayonnement et transmettre la chaleur au fluide caloporteur avec un minimum de pertes [8].

- **Ses caractéristiques :**

Il doit être bon conducteurs, léger pour éviter l'inertie thermique. Certains absorbeurs ont des surfaces traitées pour piéger les rayons solaires. Ces surfaces devront être [25]:

- De faible épaisseur pour assurer un passage convenable de l'énergie captée.

- Stable dans le temps pour conserver ses propriétés d'origine.

En général, ces revêtements sont faits par des traitements chimiques, et d'autres à base de peinture noire sélective.

Tableau II.2 : «Caractéristiques thermo-physiques de matériaux métalliques [5]»

| Matière | Conductibilités (w/m°C) | Chaleur massique (Kcal/Kg°C) | Masse volumique (Kg/m³) |
|----------------------|------------------------------------|---|---|
| Aluminium | 230 | 0.214 | 2700 |
| Cuivre | 380 | 0.094 | 8930 |
| Zinc | 112 | 0.092 | 7130 |
| Acier | 52 | 0.174 | 7900 |
| Inox | 52 | 0.17 | 7900 |
| Matière Plast | 0.2 – 0.4 | 0.2 – 0.25 | 1000- 1500 |

Deux coefficients déterminent les caractéristiques de ces absorbeurs [25]:

- α : coefficient d'absorption (optimal : 1).

- ε : coefficient d'émission (optimal : 0).

Selon les caractéristiques escomptées, le traitement de surface peut être obtenu par des procédés électrochimiques ou électro-physiques.

Nous résumons les propriétés des revêtements dans le tableau ci-dessous [5]:

Tableau II.3 : « Propriétés optiques des revêtements les plus utilisés ».

| Revêtement | Absorption : α | Emmision : ε |
|----------------------|---|--|
| Peinture noire | 0,9 – 0,95 | > 0,85 |
| Black chrome | 0,95 | 0,12 – 0,18 |
| Traitement sous vide | >0,95 | < 0,05 |

Chapitre II : Etude théorique d'un capteur solaire plan à air.

Par ailleurs, la forme de l'absorbeur influence également le rendement du capteur. Ainsi la figure II.4 montre les formes les plus utilisées dans les capteurs solaires commercialisés [28]:

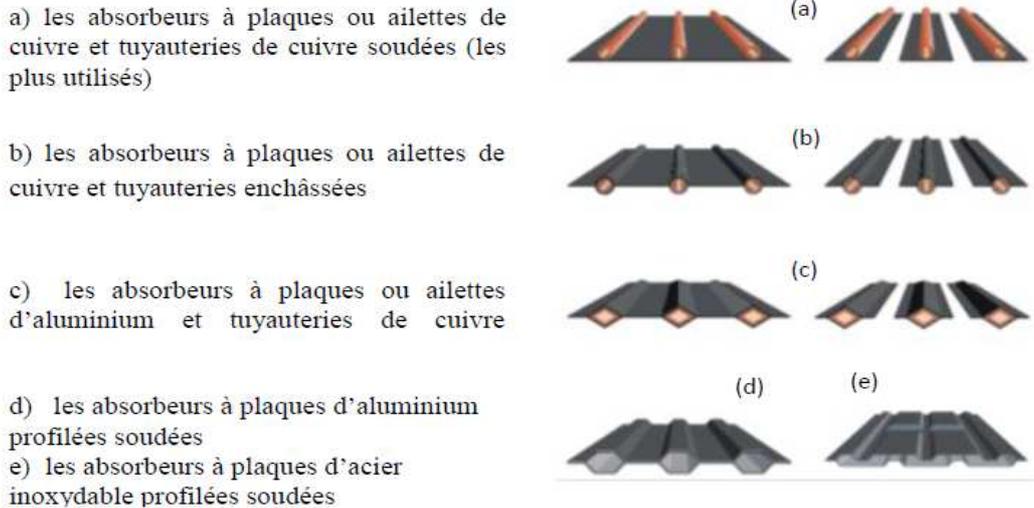


Figure II.4 : Diverses formes d'absorbeurs (d'après DGS Solar Antalgen [29]).

De ce fait, des chercheurs ont proposé d'augmenter le transfert thermique entre l'absorbeur et le fluide caloporteur (sans toucher les dimensions du capteur) par l'ajout des obstacles (ailettes) (Figure (II.5)) jointes à la face inférieure de l'absorbeur, «Bourhaleb.H» (1987) [25], (N. Moumami et al (2004) [30], A. Abene et al (2004) [31], S. youcef-Ali (2005) [26], A. Ucar et M. Inalli (2006) [32], Hikmet Esen (2008) [33], Ho-Ming yeh et Chii-Dong Ho (2009)) [34], selon ces auteurs, les obstacles peuvent augmenter la surface d'échange, réduire les zones mortes et créer la turbulence.

«Bourhaleb.H» (1987) [25], et aussi A. Abene et al (2004) [31], ont montré que la forme, les dimensions, l'orientation et la disposition de ces obstacles influents considérablement sur l'efficacité du capteur (comme souligné par K. R. Ahrwal et B. K Gandhi (2008) [35]).



Figure II.5 : Différentes formes des ailettes ajoutées à l'absorbeur pour améliorer l'efficacité de l'absorbeur (A. Abene et al (2004)) [31].

II.1.4.3 Veine d'air :

Pour une veine d'air immobile comprise entre 1.5 et 3.5 cm le coefficient d'échange convectif reste inchangé.

Dans le cas où la hauteur de cet espace d'air dépasse 4cm, les mouvements de convection deviennent importants, car l'air se déplace en fonction des variations de température, en suivant les lois des gaz.

Il faut qu'elle soit étanche et veiller aux pressions obtenues pour éviter le dépôt d'humidité sur la vitre [25].

II.1.4.4 Veine d'air mobile :

La géométrie du circuit empreinte par le fluide caloporteur à une importance capitale sur l'échange thermique. Il est nécessaire d'assurer une irrigation totale de la surface de l'absorbeur pour éviter des zones mortes, pour cela on a introduit des chicane de forme bien définie, dont les détails seront précisés par la suite [25].

II.1.4.5 Le fluide caloporteur :

Le fluide caloporteur est chargé de transporter la chaleur entre deux sources ou plusieurs sources de température. Il est choisi en fonction de ses propriétés physiques et chimiques, il doit posséder une conductivité thermique élevée, une faible viscosité et une capacité calorifique élevée [8].

Dans notre travail on utilise l'air, la façon de passage de l'air a une influence considérable sur l'efficacité du capteur solaire.

Selon M. N. Bargach et al (2004) [36], C. D. Ho et al (2005) [37], l'augmentation de la circulation du fluide caloporteur augmente la puissance du capteur solaire.

De même M. Augustus Leon et S. Kumar (2007) [38], ont montré que le débit d'air a l'effet le plus fort sur l'efficacité d'échanges thermiques et par conséquent sur le rendement.

D'après le travail expérimental et numérique de Marwa. M. Hassan et Yvan Beliveau (2007) [39], la diminution du débit massique augmente la température du fluide et décroît les gains globaux de la chaleur, au dessus d'un débit de 0.06 m³/h, la température du fluide n'augmente plus.

II.1.4.6 L'isolant thermique :

Son rôle est très important surtout dans les applications solaires, elle permet de calorifuger le système.

Les isolants les plus utilisés sont [25]:

- La laine de roche et les mousses de polystyrène ou polyuréthane dont l'épaisseur varie de 4 à 8cm. Ces produits doivent résister aux températures de fonctionnement.

Rappelons que le meilleur isolant, c'est l'absence de matières, donc le vide absolu, assez couteux mais efficace. Il est utilisé surtout dans les capteurs à hautes températures.

Tableau II.4 : « Propriétés thermiques de quelques matériaux isolants [5] ».

| Matériau | Facteur de transmission solaire (%) | Masse volumique (kg/m³) | Chaleur massique (J/kg.K) | Diffusivité (10⁻⁷ m²/s) |
|----------------------------|--|---|----------------------------------|--|
| Air | 0,025 | 1,2 | 1003 | 208 |
| Mousse de Polyuréthane | 0,029 | 30 | 1600 | 6,0 |
| Laine de verre | 0,036 | 40 | 840 | 10,7 |
| Polyester expansé | 0,040 | 20 | 1500 | 13,3 |
| Papier de journal comprimé | 0,105 | 130 | 1340 | 6,0 |
| Bois de pin | 0,118 | 500 | 1210 | 1,95 |
| Plâtre | 0,35 | 800 | 800 | 5,5 |

Selon N. T. Ahmed (2001) [40], on peut réduire ces pertes en utilisant de l'isolation transparente (ici un film de bulles d'air). Aussi Fayza Benyelles et al (2007) [41], ont montré qu'on peut utiliser l'aérogel (matériau poreux de faible conductivité thermique) comme une superbe isolant de la face avant du capteur solaire plan.

II.1.4.7 Le coffre :

Il permet l'assemblage des différents éléments du capteur. Il doit assurer une protection efficace aux agents atmosphériques. Il est réalisé en bois ou en aluminium [25].

II.1.5 Principaux paramètres caractérisant un capteur :

Le fonctionnement d'un capteur solaire est caractérisé par de nombreux paramètres dont les plus importants sont [25]:

II.1.5.1 Le rendement :

Le rendement d'un capteur est le rapport entre l'énergie extraite par le fluide caloporteur pendant un intervalle de temps donné et le produit de l'irradiation solaire pendant le même intervalle de temps, sur le capteur par sa superficie, dans les conditions de l'état stationnaire.

II.1.5.2 La superficie :

La superficie d'entrée est l'aire maximale de la section droite du rayonnement pouvant atteindre le volume contenant l'absorbeur, directement ou par réflexion.

II.1.5.3 La stagnation :

La stagnation est l'état d'un capteur ou d'un système sans circulation du fluide caloporteur.

La température de stagnation se réfère généralement à la température du fluide caloporteur sans circulation où les déperditions thermiques sont égales au flux du rayonnement solaire incident.

II.1.5.4 Orientation et inclinaison des capteurs solaires :

Les capteurs solaires sont orientés et inclinés suivant l'utilité que l'on désire donner au système. En général, l'orientation des capteurs dans l'hémisphère nord doit être plein sud, car le soleil suit chaque jour une trajectoire apparente Est-sud-ouest, à l'encontre dans l'hémisphère sud où l'orientation doit être vers le nord [5].

Beaucoup d'études ont été menées pour déterminer ou du moins estimer, le meilleur angle de l'inclinaison des capteurs solaires. En pratique, la règle générale pour un utilisation annuelle est : $\varphi + 10^\circ$, tel que (φ) est la latitude du lieu, alors que certains chercheurs suggèrent deux valeurs pour l'angle optimal de l'inclinaison, un pour l'été ($\varphi - 20$) et l'autre pour l'hiver ($\varphi + 20$), Dans les dernières années, les programmes informatiques ont été utilisés et les résultats ont montré que l'angle optimum de l'inclinaison est presque égal à la latitude φ du lieu [42] (Figure II.6).

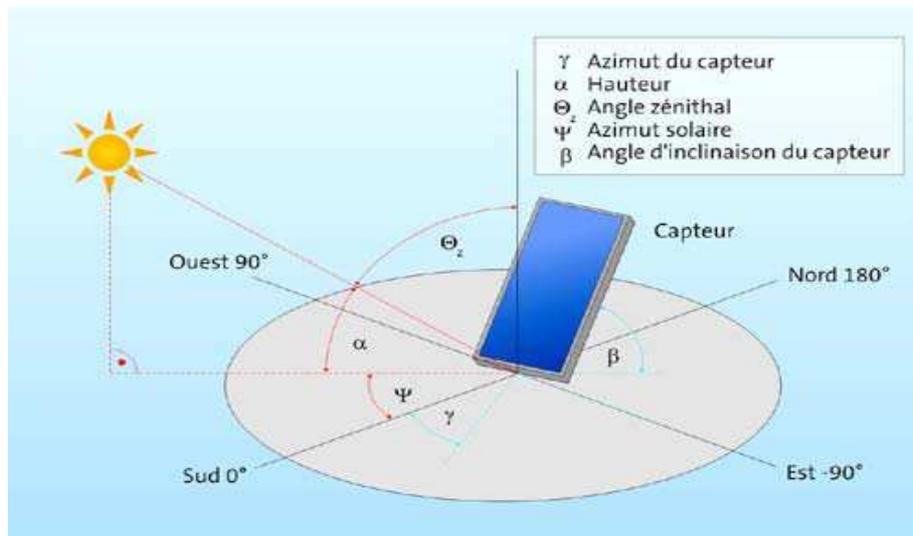


Figure II.6: L'orientation du Capteur solaire plan.

II.2 Etude des capteurs fonctionnant à basse température :

II.2.1 Etude théorique :

Le capteur héliothermique absorbe la plus grande partie de l'énergie incidente. La surface absorbante non isolée constitue le siège des déperditions thermiques vers l'extérieur [25].

II.2.1.1 Mécanisme des pertes :

La réémission du rayonnement se réalise à partir de l'absorbeur et de la vitre du capteur, l'air chaud compris entre ces deux éléments dans l'espace hermétiquement fermé tend à s'élever. Quand à l'air frais, il descend produisant ainsi un courant de convection naturelle. Des fuites d'air peuvent aussi se produire par des gradients de pression et de température accentuées par le vent [5-25].

Le but de l'opération c'est de récupérer le maximum de chaleur produite par le capteur en minimisant les pertes.

II.2.1.2 Equation linéaire simplifiée :

$$Q_u = Q_s - Q_p \quad (II.1)$$

Cette relation exprime le bilan thermique global d'un collecteur plan en régime permanent [25].

Si on veut augmenter l'énergie utile (Q_u) pour une température de fonctionnement, on peut envisager deux possibilités :

Augmenter (Q_s) ou diminuer (Q_p).

Le premier choix consiste à utiliser la concentration du flux solaire incident mais l'inconvénient c'est qu'elle ne peut intervenir que pour le rayonnement direct, donc concentrateurs ne sont envisagés que dans des conditions bien particulières.

Chapitre II : Etude théorique d'un capteur solaire plan à air.

La 2^{ème} démarche c'est de munir la surface absorbante d'un équipement sélectif, perméable à tout transfert énergétique dans le sens environnement – capteur.

II.2.1.3 Bilan de fonctionnement :

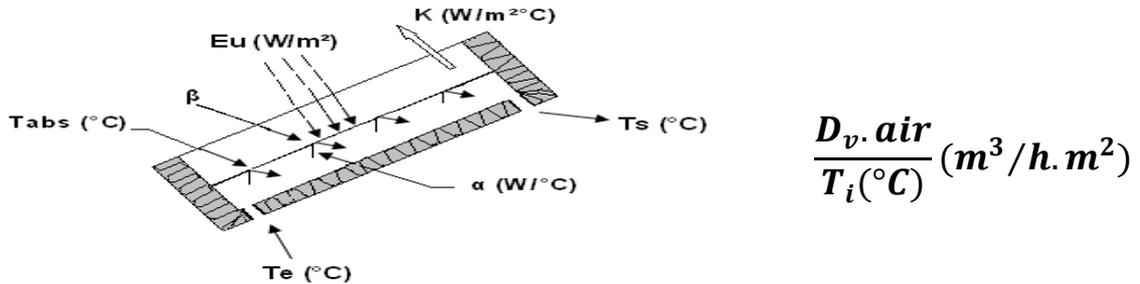


Figure II.7 : Schéma donnant le bilan thermique moyen d'un capteur solaire à air [25].

Les ouvrages généraux sur les capteurs solaires proposent des bilans énergétiques, sans préciser la nature de leur étude (expérimentation, simulation numérique ou étude théorique). De plus, ces références précisent rarement les caractéristiques du système étudié (sélectivité de l'absorbeur, épaisseur d'isolant, couverture, ...). C'est pourquoi, ces résultats sont à prendre avec précaution et surtout à titre indicatif. Ainsi, on peut citer le travail de Cardonnel [43], qui propose un bilan (voir figure II.8) sans préciser les hypothèses d'obtention de ces valeurs.

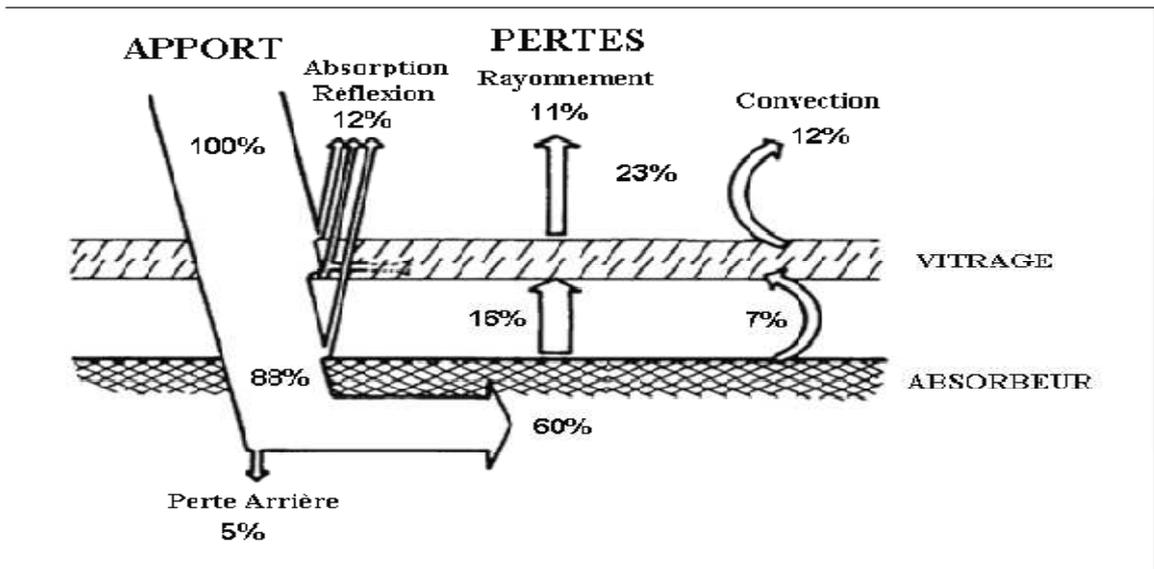


Figure II.8 : Schéma représentant Bilan thermique d'un capteur solaire plan vitré [29].

Cependant, les auteurs s'accordent à dire que les pertes latérales et arrières restent négligeables devant les pertes thermiques face avant du capteur qui demeurent les plus importantes ; on appelle face avant, la partie du capteur orientée vers le ciel entre l'absorbeur et l'extérieur.

Si on désigne par (Q_p) l'énergie perdue, qui est fonction de la qualité du capteur, de la température de fonctionnement, on a [25]:

$$Q_p = Q_{av} - Q_{ar} \quad (II.2)$$

Avec :

Q_{av} : Pertes par la face avant qui dépend de la transmission de la couverture et de l'absorbeur de cette face.

Q_{ar} : Pertes par la face arrière.

- **Pertes par la face arrière :**

$$Q_{av} = k(T_u - T_a) \quad (II.3)$$

Avec :

k : Coefficient d'échange thermique ($W/m^2°C$) [5].

$$k = \frac{1}{0.15 + \frac{\lambda}{e}} \quad (II.4)$$

λ : Coefficient de conductibilité thermique.

T_u : Température moyenne du fluide.

T_a : Température ambiante.

Ces pertes sont égales à $50W/°C$ pour une isolation (laine de verre) de 7.5 cm d'épaisseur.

- **Pertes par la face avant :**

$$Q_{ar} = Q_I + Q_{II} \quad (II.5)$$

Les pertes avant sont beaucoup plus importantes ; elles sont dues aux échanges radiatifs et convectifs.

- **Pertes par rayonnement : (absorbeur – vitrage)**

Il s'agit de deux parois parallèle face à face ; la quantité de chaleur échangée s'écrit :

$$Q_I = \sigma(T_{abs}^4 - T_{couv}^4) * \frac{1}{\frac{1}{\varepsilon_a} + \frac{1}{\varepsilon_c} - 1} \quad (II.6)$$

Cette formule s'applique pour le calcul du transfert absorbeur – vitre.

$\varepsilon_a, \varepsilon_c$: Émissivité des deux surfaces.

$\sigma = 5.68 \cdot 10^{-8} W/m^2 K^4$ (Constante de BOLTZMANN).

$$(T_{abs} - T_{couv}) = (T_{abs} - T_{vitrage}) \quad (II.7)$$

- **Pertes par convection** : (dans la lame d'air entre absorbeur – vitre)

$$Q_2 = h(T_{abs} - T_{couv}) \quad (II.8)$$

Avec :

h : Coefficient de transfert par convection.

Plusieurs déterminations ont été proposées pour définir ce coefficient en tenant compte de :

- La température moyenne de l'air.
- De la hauteur de la veine d'air.
- De l'état des surfaces.
- Des températures des surfaces.

Utilisons le nombre de « **NUSSELT** » et le celui de « **GRASHOF** », qui sont introduit par la similitude en mécanique des fluides :

$$Nu = \frac{h \cdot e}{k} \quad Gr = \frac{\rho \cdot \beta \cdot g \cdot AT}{\mu^2}$$

Avec :

k : Conductibilité thermique de l'air.

e : Épaisseur de la veine d'air.

g : Accélération de la pesanteur.

μ : Viscosité cinétique.

β : Dilation thermique de l'air.

Pour l'air dans les conditions d'emploi : $Pr=0.733$ [25] donc :

* **Conditions d'utilisations de ces relations** :

$10^4 < Gr < 10^7 \implies Nu=0.152 (Gr)^{0.28}$ pour capteurs horizontaux.

$Nu=0.093 (Gr)^{0.31}$ pour capteurs inclinés de

45°.

Si « Ψ » est l'angle d'inclinaison du capteur sur l'horizontale [25]:

$$Nu=0.060 - 0.017 (\Psi/90) \cdot (Gr)^{0.33}$$

Pour un capteur incliné de 45°, on trouve $h=3.5w/m^2 \cdot C$

$$(T_{abs} - T_{couv}) = 60 \implies Q_2 = 210w/m^2$$

En 1987 «Bourhaleb.H» [25]. Présente ces bilans thermiques :

- **Le bilan thermique entre Absorbeur et couverture est :**

$$Q_I = \frac{1}{\frac{1}{\varepsilon_a} + \frac{1}{\varepsilon_c} - 1} \sigma (T_{abs}^4 - T_{couv}^4) + h(T_{abs} - T_{couv}) \quad (II.9)$$

• **Pertes entre couverture et l'environnement :**

- Pertes avant par rayonnement entre couverture – environnement [25]:

$$Q_3 = \sigma \cdot \varepsilon_v (T_{couv}^4 - T_c^4) \quad (II.10)$$

- Pertes convectif de la couverture – environnement :

$$Q_4 = h_f (T_{couv} - T_a) \quad (II.11)$$

• **Bilan d'échange entre couverture – environnement :**

$$Q_{II} = Q_3 + Q_4$$

$$Q_{II} = \sigma \cdot \varepsilon_v (T_{couv}^4 - T_c^4) + h_f (T_{couv} - T_a) \quad (II.12)$$

Avec :

ε_a : Émissivité de l'absorbeur (=0.95 peinture noire mat).

ε_v : Émissivité de la couverture (=0.90 verre de 4mm d'épaisseur).

La formule de Klein est utilisée pour ce calcul [5] :

$$\varepsilon_v = \frac{T_{abs} - T_a}{\frac{c}{T_{abs}} \left[\left(\frac{T_{abs} - T_a}{N + f} \right)^{0.33} + \frac{1}{h_f} \right]} + \frac{\sigma (T_{abs}^4 - T_c^4)}{1 / [\varepsilon + 0.05N(1 - \varepsilon)] + \varepsilon_v / (2N + f - 1) - N} \quad (II.13)$$

Avec :

$$f = (1 - 0.04h_f + 0.0005h_f) \cdot (1 + 0.091N) \quad (II.14)$$

$$c = 365.9(1 - 0.00883\Psi + 0.00013\Psi^2) \quad (II.15)$$

$\sigma = 5.68 \cdot 10^{-6} \text{ w/m}^2\text{K}$ (constante de BOLTZMANN).

Ψ : Inclinaison des capteurs en degrés.

N : Nombre de couvertures.

ε : Facteur d'émission de l'absorbeur.

ε_v : Facteur d'émission de la couverture.

h_f : Coefficient d'échange entre couverture et air extérieur.

T_{abs} : Température moyenne de l'absorbeur en [K].

T_a : Température moyenne de l'air ambiant en [K].

T_c : Température moyenne de ciel.

Dans ce sens, Sartori [44] présente en 2006, une synthèse des principales relations permettant de déterminer ce coefficient de transfert convectif. La plupart de ces coefficients sont de la forme [25]:

$$h_{vent} = a + b \cdot V_{vent}^n \quad (II.16)$$

Ils diffèrent suivant les valeurs des paramètres a, b et n. Ainsi, MacAdams propose la relation suivante, qui est la plus couramment utilisée pour l'étude des capteurs solaires plans [7].

$$h_{vent} = 5.7 + 3.83 \cdot V_{vent} \quad (II.17)$$

Comme exemple, pour un vent nul, $h_f = 5.7 \text{ W/m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}$

Pour $V=20\text{km/h}$, $h_f = 27\text{W/m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}$

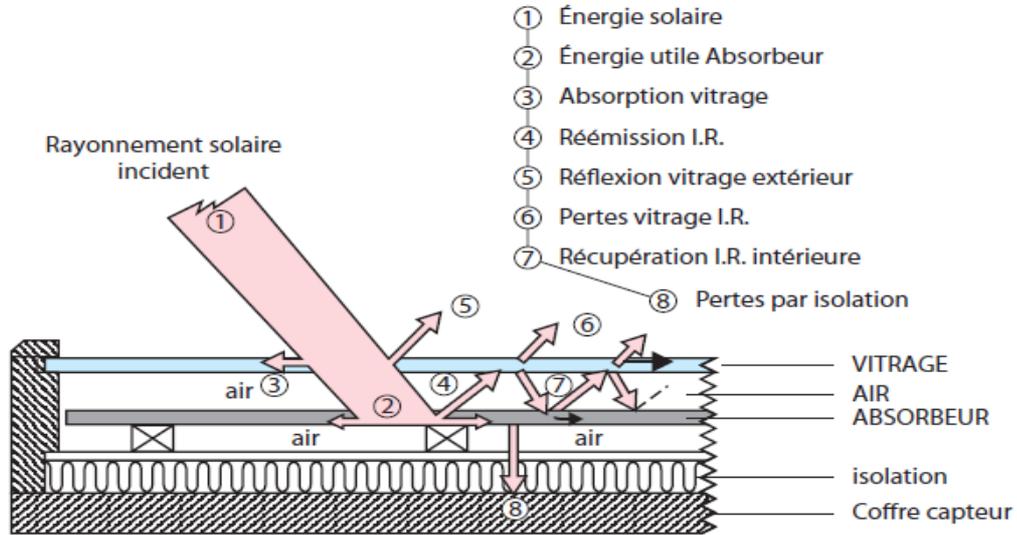


Figure II.9: les pertes thermiques dans un capteur solaire plan [5].

II.2.2 Modèle mathématique traduisant le fonctionnement d'un capteur :

Les différentes pertes estimées précédemment peuvent être regroupées sous forme d'équations simplifiées [25].

II.2.2.1 Puissance dissipée :

$$Q_p = Q_{av} + Q_{ar} \quad (\text{II.18})$$

Pour les applications pratiques on introduit un coefficient de pertes globales k :

$$Q_{av} = K_{av}(T_{abs} - T_a) \quad (\text{II.19})$$

$$Q_{ar} = K_{ar}(T_{abs} - T_a) \quad (\text{II.20})$$

Donc : $Q_p = K(T_{abs} - T_a) \quad (\text{II.21})$

K , K_{av} et K_{ar} sont des coefficients d'échange thermique de l'absorbeur.

T_a : température moyenne de l'air ambiant.

Tableau donnant quelque valeur du coefficient K .

Pour $T_a=10^\circ\text{C}$, $V=5\text{m/s}$.

Tableau II.5 : « valeur du coefficient K » [25].

| T_{abs} | Vitrage | Abs. sélectif | K(w/m ² °C) |
|-----------|-----------------|---------------|------------------------|
| 40 | 0 | Non | 22 |
| 100 | 1 | Non | 8 |
| 100 | 1 | Oui | 4 |
| 100 | 2 | Non | 4.3 |
| 100 | 2 | Oui | 2.5 |
| 100 | 1 plasti-tadler | Non | 9.2 |
| 100 | 2 plasti-tadler | Non | 5.2 |

II.2.2.2 Puissance récupérée par un capteur plan :

$$Q_u = \dot{m} \cdot cp \cdot (T_s - T_e) \quad (II.17)$$

La mesure du débit et la variation de la température du fluide caloporteur à la traversée du capteur, permet grâce à cette équation de déterminer expérimentalement la quantité de chaleur recueillie et de déterminer les performances du capteur.

II.2.2.3 Performance d'un capteur :

En référence aux machines thermiques on utilise la notion de rendement d'un capteur déterminé par [25]:

$$\eta = \frac{\text{energie utile recueillie par le capteur}}{\text{energie solaire incidente sur le capteur}} \quad (II.22)$$

Il est important de remarquer que les conditions d'utilisation (le soleil, est une variable aléatoire) obligent à définir un rendement sur un intervalle de temps « dt » à préciser

$$\frac{\int_{t_1}^{t_2} \dot{m} \cdot cp \cdot (T_s - T_e) dt}{\int_{t_1}^{t_2} I dt} \quad (II.23)$$

On peut donc définir un rendement instantané, journalier, mensuel ou annuel pour comparer la performance des différents capteurs.

Avec :

\dot{m} : Débit massique.

Cp : capacité calorifique.

Ts: température sortie capteur.

Te: température entrée capteur

I: ensoleillement.

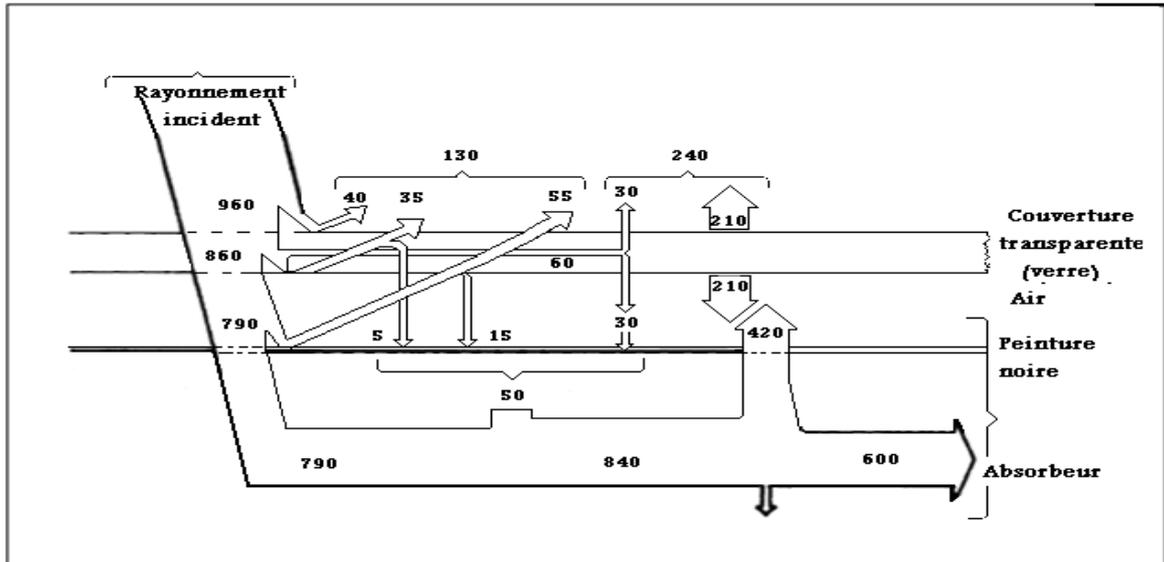


Figure II.10 : Schéma donnant un exemple numérique sur les échanges d'après D.ROUX [25].

Conclusion :

Le choix entre les types de capteurs solaires est déterminé par le type d'application recherchée, la fiabilité, le prix et les températures souhaitées.

A partir de cette étude théorique, on a plusieurs types de capteurs solaires plans, ainsi que le système de stockage en utilisant le mur Trombe.



Chapitre III
Modélisation
mathématique et
présentation de
Fluent

Introduction :

Avant de se consacrer à la simulation numérique d'un phénomène, il convient de se préoccuper des lois qui le régissent et aussi de préciser les modélisations physique et numérique adoptées. Ce chapitre a pour objectif de détailler le système d'équations qui sera à la base de la simulation bidimensionnelle ainsi que les grandes lignes de la méthode numérique et les algorithmes utilisés.

Le passage d'un problème aux dérivées partielles continu à un problème discret s'appuie sur les méthodes classiques d'analyse numérique. On distingue trois grandes méthodes pour formuler un problème continu sous forme discrète, la méthode des différences finies, des éléments finis et des volumes finis.

Dans la présente étude, le calcul est mené à l'aide d'un code de calcul industriel, CFD (Computation Fluid Dynamics) « FLUENT » 6.3.26 qui utilise la méthode des volumes finis, nécessitant un maillage conçu par le logiciel « GAMBIT 2.3.16 ».

GAMBIT est le modéleur associé à FLUENT où l'on décrit la géométrie et le maillage du problème à traiter ainsi que le type des conditions aux limites. Il permet de mailler en utilisant des éléments de type (tétraèdre, hexaèdre ..., ou mixte). Il permet aussi de définir le type des différentes frontières du système ainsi que la nature du (des) domaine(s) décrit(s) globalement (solide ou fluide). Dans notre étude les deux frontières (haut et bas) sont considérées comme des parois indépendantes, donc on les nomme et on leur donne un type (ici Wall « pour paroi ») [46].

Donc sous FLUENT, le travail va consister à assurer successivement :

- Le choix des équations traitées.
- La description des conditions aux limites.
- La gestion de la résolution.
- L'analyse des résultats.

Ce qui incite à étudier numériquement une chaîne énergétique décomposée par les fonctions suivantes : Stockage et Captation.

III.1 Le système d'équation :

Pour formuler un phénomène physique, on utilise souvent des équations mathématiques. Ces dernières représentent une modélisation de ce phénomène. Une formulation mathématique doit obligatoirement exprimer le comportement de ce phénomène dans l'espace et dans le temps.

Les équations gouvernantes sont l'équation de conservation de la masse, les équations de Navier-Stokes, l'équation de conservation de l'énergie dans le fluide et dans le solide et les équations de la turbulence.

De façon à obtenir un modèle mathématique simple qui décrit la physique de ce problème, on suppose les Hypothèse simplificatrices suivantes:

- L'écoulement et le transfert de chaleur sont bidimensionnels;
- L'écoulement d'air est supposé turbulent et stationnaire;
- Les propriétés physiques du fluide (C_p , μ , λ_f , ρ) et du solide (λ_s) sont constantes et évaluées à la température du fluide à l'entrée du canal ;
- Le fluide est newtonien et incompressible ;
- Les Profils de vitesse et de température sont uniformes ;
- La température des parois (supérieure et inférieure) sont constantes;
- Le transfert de chaleur par rayonnement est négligeable.

III.1.1 Conservation de la masse [47]:

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} = 0 \quad (\text{III.1})$$

Où u et v étant les composantes du champ de vitesse dans les directions axiale (ox) et radiale (oy) respectivement.

III.1.2 Conservation de la quantité de mouvement :

III.1.2.1 Conservation de la quantité de mouvement suivant la direction axiale :

$$\rho u \frac{\partial u}{\partial x} + \rho v \frac{\partial u}{\partial y} = -\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} [(\mu + \mu_t) (2 \frac{\partial u}{\partial x})] + \frac{\partial}{\partial y} [(\mu + \mu_t) (\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y})] \quad (\text{III.2})$$

III.1.2.2 Conservation de la quantité de mouvement suivant la direction radiale :

$$\rho u \frac{\partial v}{\partial x} + \rho v \frac{\partial v}{\partial y} = -\frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial y} [(\mu + \mu_t) (2 \frac{\partial v}{\partial y})] + \frac{\partial}{\partial x} [(\mu + \mu_t) (\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x})] \quad (\text{III.3})$$

III.1.3 Conservation d'énergie :

III.1.3.1 Conservation d'énergie dans le fluide :

$$\rho u \frac{\partial T}{\partial x} + \rho v \frac{\partial T}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x} \left[\left(\frac{\mu}{\rho r} + \frac{\mu_l}{\sigma_r} \right) \frac{\partial T}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[\left(\frac{\mu}{\rho r} + \frac{\mu_l}{\sigma_r} \right) \frac{\partial T}{\partial y} \right] \quad (III.4)$$

III.1.3.2 Conservation d'énergie dans la paroi :

$$\left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) = 0 \quad (III.5)$$

III.1.4 Modèle de turbulence $k - \varepsilon$:

Le modèle ($k - \varepsilon$) standard est un modèle semi empirique basé sur les équations de transport de l'énergie cinétique turbulente « k » et de sa dissipation « ε ». L'équation modélisée de l'énergie turbulente est dérivée de l'équation exacte. Celle de la dissipation est obtenue sur la base d'un raisonnement physique [46].

L'équation de l'énergie cinétique est donnée comme suite:

III.1.5 Energie cinétique turbulente k :

$$\rho u \frac{\partial k}{\partial x} + \rho v \frac{\partial k}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial y} \right] + p_k - \rho \varepsilon \quad (III.6)$$

III.1.6 Energie de dissipation ε :

$$\rho u \frac{\partial \varepsilon}{\partial x} + \rho v \frac{\partial \varepsilon}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial y} \right] + (C_{\tau 1} f_1 p_k - \rho C_{\tau 2} f_2 \varepsilon) \frac{\varepsilon}{k} \quad (III.7)$$

p_k : Représente le terme de production d'énergie cinétique :

$$p_k = \mu_t \left[2 \left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + 2 \left(\frac{\partial v}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} \right)^2 \right] \quad (III.8)$$

La viscosité turbulente est obtenue en combinant k et ε comme suit:

$$\mu_t = f_\mu \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (III.9)$$

Les constantes empiriques du modèle de turbulence $k - \varepsilon$ standard sont :

$$C_\mu = 0.09, C_{\tau 1} = 1.44, C_{\tau 2} = 1.44, \sigma_k = 1.0, \sigma_\varepsilon = 1.3, \sigma_\zeta = 0.9$$

$$\text{Et } f_1 = f_2 = f_\mu = 1.0$$

III.2 Présentation des les méthodes classiques d'analyse numérique :

III.2.1 Méthodes des différences finies :

C'est la méthode la plus ancienne, le principe fondamental de cette méthode consiste au domaine d'étude un maillage en nœuds dont la finesse permet de donner une approximation des contours du domaine.

Ensuite, en appliquant le développement dans chaque nœud du maillage, ce qui permet d'obtenir un nombre d'équation algébrique égale au nombre des valeurs d'inconnues des grandeurs étudiées [48].

III.2.2 Méthodes des éléments finis :

La méthode consiste à mailler l'espace en régions élémentaires dans lesquelles on représente la grandeur recherchée par une approximation polynomiale. Le maillage peut être constitué de triangles ou de rectangles aux sommets desquels on recherche des volumes de l'inconnue en supposant que, dans ce domaine, l'inconnue varie linéairement en fonction des coordonnées. Une telle méthode nécessite donc de mailler tout l'espace étudié. Elle conduit à des tailles importantes en mémoire des calculateurs et à des temps de calcul longs qui nécessitent souvent des stations de travail pour la résolution des problèmes industriels [48].

III.2.3 Méthodes des volumes finis :

La méthode des volumes finis est caractérisée par son avantage à satisfaire la conservation de masse, de quantité de mouvement et d'énergie dans tous les volumes finis ainsi que dans tout le domaine de calcul. Elle facilite la linéarisation des termes non linéaires dans les équations de conservation tel que le terme source par exemple. La méthode consiste à partager le domaine de calcul en plusieurs volumes, où chaque volume entoure un nœud [48].

III.2.4 Méthode de résolution des équations de transport :

III.2.4.1 Schéma de discrétisation :

Notre code emploie la méthode des volumes finis pour la résolution des systèmes d'équations utilisés pour modéliser les mouvements des fluides. En fait, avec la méthode des volumes finis, un problème physique donné est résolu suivant trois principales étapes :

- Division du domaine de calcul en volumes de contrôle via un maillage (voir figure III.1),

- Intégration des équations sur chaque volume de contrôle afin de les transformer en équations algébriques,
- Résolution des équations ainsi discrétisées.

Ces équations sont mises sous la forme générale suivante :

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \varphi) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho U_i \varphi) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\Gamma_\varphi \frac{\partial \varphi}{\partial x_i} \right) + S_\varphi \quad (\text{III.10})$$

Où ρ : représente une grandeur intensive telle que U_i, H_m, k, ε ou $\overline{u'_i u'_j}$ selon le modèle de turbulence utilisé. Γ_φ est un coefficient de diffusion et S_φ un terme de source dont les expressions respectives dépendent du modèle de turbulence choisi. Sous cette forme générale, tous les termes non-convectifs ou non-diffusifs sont inclus dans le terme source S_φ .

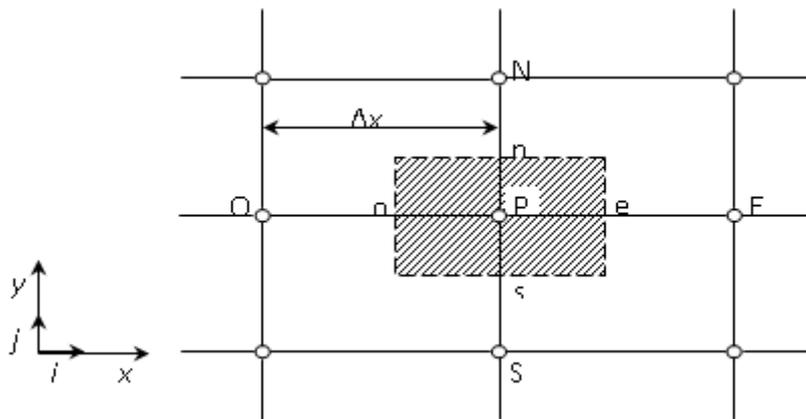


Figure III.1 : Volume de contrôle pour la résolution en volume fini [48].

La figure III.1 représente la discrétisation en volumes finis des équations de transport. Les différentes grandeurs de l'écoulement sont calculées au centre de chaque volume de contrôle, aux points: P, E, O, N et S. l'intégration de l'équation III.10 dans un volume de contrôle fait intervenir les valeurs, ainsi que les flux de diffusion et de convection et de conservation de ces grandeurs aux frontières du volume de contrôle. Ainsi, pour le calcul des grandeurs au point P, leurs valeurs aux interfaces : e, o, n et s sont également nécessaires. Plusieurs méthodes d'interpolation peuvent alors être utilisées connaissant leurs valeurs au centre des volumes de contrôle adjacents.

On note ainsi que bien qu'une approximation par différences finies centrées des termes de diffusion au deuxième ordre soit adaptée à la majorité des problèmes, cette technique ne donne pas de résultats satisfaisants en ce qui concerne les termes convectifs. En effet, la méthode des différences centrées ne prend pas correctement en compte la direction de l'écoulement. La figure III.2 permet d'illustrer ce défaut majeur.

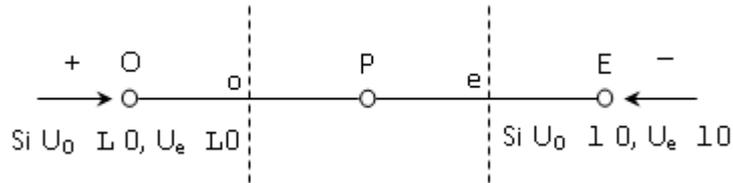


Figure III.2 : Schéma unidimensionnel illustrant un volume élémentaire entourant un nœud P [48].

Les valeurs d'une entité ϕ aux interfaces et o sont déterminées par une approximation linéaire à l'aide des expressions suivantes :

$$\phi_e = \frac{1}{2}(\phi_P + \phi_E) \quad (\text{III.11})$$

$$\phi_o = \frac{1}{2}(\phi_o + \phi_P) \quad (\text{III.12})$$

Sur la base de ces deux dernières expressions, on peut noter que les points situés en amont et aval ont le même poids pour le calcul des valeurs à l'interface quelle que soit la vitesse de l'écoulement. Mais il peut exister un fort transport de la gauche vers la droite (ou inversement) de l'interface. Dans un tel cas, cette formulation n'est plus valable parce qu'elle peut générer des instabilités numériques quand le transport à travers une face d'un volume de contrôle est prépondérant par rapport à la diffusion. Le nombre de Peclet de maille permet à cet effet de quantifier l'importance relative des phénomènes convectifs et diffusifs :

$$Pe_{\text{maille}} = \frac{\rho U \Delta x}{\Gamma_\phi} \quad (\text{III.13})$$

Où ρU et Γ_ϕ considérés constants le long de Δx . On a ainsi pu constater que lorsque le nombre de Peclet de maille construit sur la dimension du maillage et de la vitesse à l'interface est supérieur à 2, la discrétisation centrée des termes convectifs, en régime permanent, conduit à des instabilités numériques.

III.2.4.2 Choix de la méthode de couplage Pression-Vitesse :

Trois algorithmes sont disponibles dans le logiciel de calcul [49]:

- SIMPLE : le plus robuste.
- SIMPLEC : il donne une convergence plus rapide pour les problèmes simples.
- PISO : il est utile pour des problèmes des écoulements instables.

L'algorithme choisit dans notre étude est l'algorithme SIMPLE. A l'initialisation du calcul, un champ de pression fixé a priori est introduit dans l'équation de bilan de la quantité de mouvement, permettant de calculer un premier champ de vitesse. La combinaison des équations de bilan de masse et de quantité de mouvement permet ensuite de corriger ces premiers champs de pression et de vitesse. Les autres équations de transports sont ensuite résolues et le champ de pression corrigé est utilisé pour initialiser le calcul à l'itération suivante. Cette succession d'opération est répétée jusqu'à ce que les critères de convergences soient atteints.

III.2.4.2.1 Algorithme SIMPLE :

La discrétisation d'une équation de transport diffusion sur un volume de contrôle par la méthode des volumes finis fait intervenir les valeurs des vitesses aux interfaces des volumes (U_e , U_w , U_n , U_s). Il est donc intéressant de calculer ces vitesses directement sur les interfaces (sans avoir à effectuer d'interpolations). D'autre part, la discrétisation de l'équation de continuité et du gradient de pression avec l'utilisation d'une interpolation linéaire peut induire des erreurs importantes du fait qu'une répartition de pression ou de vitesse en "damier" est vue comme un champ uniforme. Pour contourner ces difficultés on préfère utiliser des grilles décalées "staggered grid". Une grille principale est construite sur laquelle on calcule la pression, la température et la concentration. Deux grilles décalées vers la droite et vers le haut respectivement sont utilisées pour le calcul des vitesses horizontale et verticale [49].

L'algorithme SIMPLE, acronyme pour « Semi-Implicit Method for Pressure Linked-Equations » permet de résoudre le système d'équations discrétisées. Cet algorithme stipule l'existence d'une relation entre les vitesses corrigées et les pressions corrigées, en vue de vérifier l'équation de conservation de la masse.

Le schéma représentatif de ce processus itératif est le suivant :

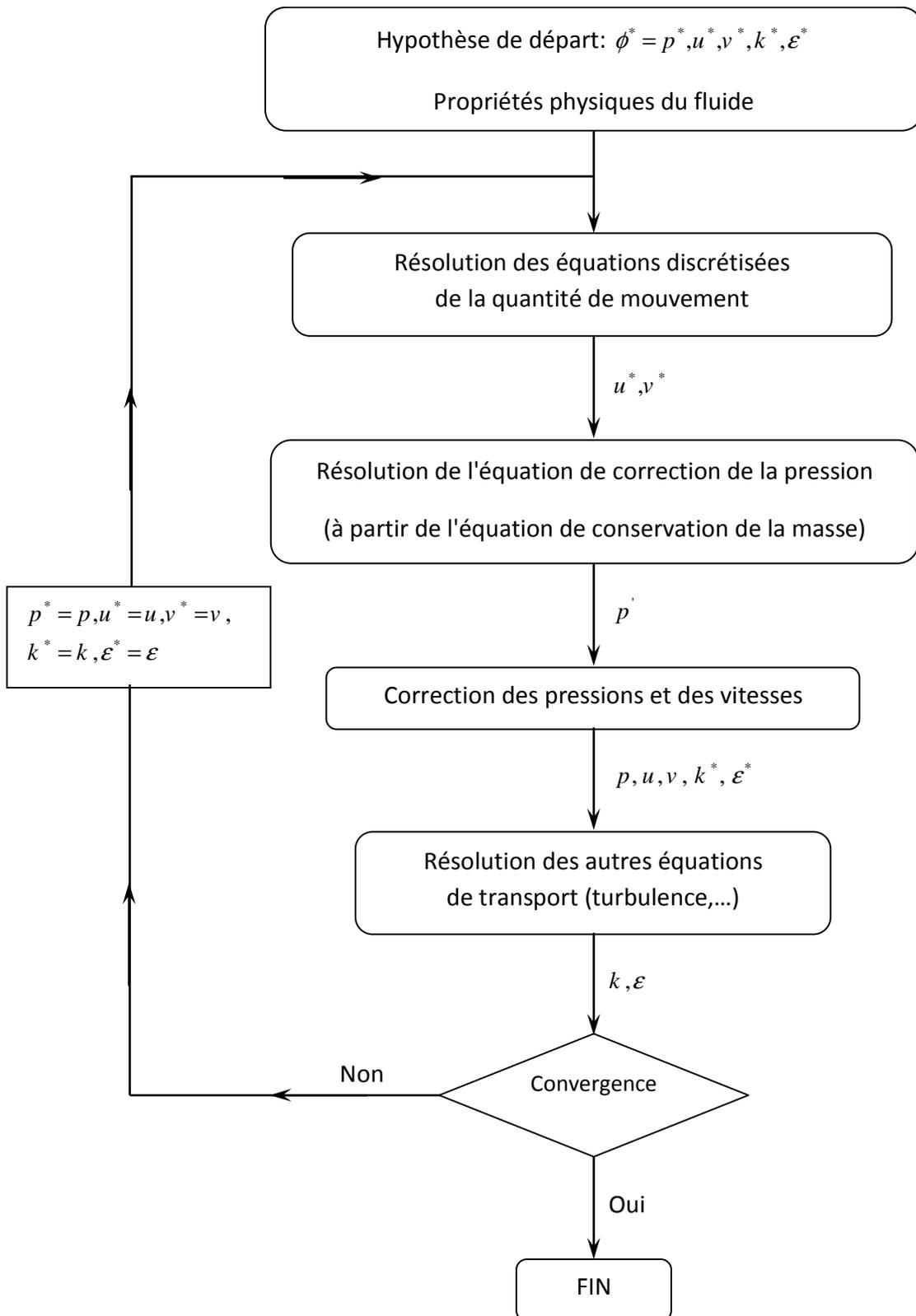


Figure III.3 : Schéma représentatif de l'algorithme SIMPLE [48].

u et v sont les deux composantes du vecteur vitesse, p représente la pression ϕ^* est défini par : $\phi = \phi^* + \phi'$, ϕ' est une correction.

III.2.5 Résolution numérique :

III.2.5.1 Paramètre de contrôle de la convergence :

La façon d'obtenir une solution convergée est un des éléments essentiels de prédiction d'écoulement au moyen des codes CFD. Le code "FLUENT" propose différentes techniques pour accélérer le processus de convergence est augmentée si une bonne estimation de la solution est donnée comme condition initiale. Nous avons recours à plusieurs techniques décrites ci-dessous :

III.2.5.1.1 Critère de convergence :

La résolution numérique des problèmes de type CFD nécessite un processus itératif. Pour apprécier la convergence du processus itératif, des critères de convergence doivent être pris en compte. Ainsi, la convergence du processus itératif est déterminée par le concept de résidu.

Après l'étape de discrétisation, l'équation de conservation d'une variable ϕ donnée sur une cellule de centre P peut s'exprimer comme suit :

$$a_p \cdot \phi_p = \sum_{nb} a_{nb} \phi_{nb} + b \quad (III.14)$$

où : a_p et a_{nb} représentent les contribution convectives et diffusives, l'indice nb est lié aux centre de cellules adjacentes. b représente la contribution de partie constante du terme source Φ_ϕ .

Le résidu normalisé a alors pour expression :

$$R^\phi = \frac{\sum_{\text{Domaine}} \left| \sum_{nb} a_{nb} \cdot \phi_{nb} + b - a_p \cdot \phi_p \right|}{\sum_{\text{Domaine}} |a_p \cdot \phi_p|} \quad (III.15)$$

Ces expressions des résidus sont valables pour toutes les grandeurs sauf la pression, dans le cas de cette grandeur, le résidu est déterminé à partir de l'équation de continuité :

$$R^C = \sum_{\text{Domaine}} | \text{taux de création de matière dans le domaine} | \quad (III.16)$$

III.2.5.1.2 Sous-relaxation

A cause de la non linéarité des équations résolues, il est possible, pour atténuer les fluctuations de la solution, de réduire les variations des variables d'une itération à une autre en introduisant une sous-relaxation. Il n'existe pas des règles générales concernant des meilleures valeurs des coefficients de sous-relaxation, mais il existe des recommandations pour chacune des grandeurs, généralement basé sur des connaissances empiriques.

III.2.6 Étapes de résolution du problème

Les principales étapes utilisées dans notre simulation sont les suivantes :

1. Détermination du domaine de calcul (construction de la géométrie).
2. Discrétisation du domaine de calcul (maillage).
3. Identification des conditions aux limites.
4. Choix du modèle mathématique.
5. Choix de l'algorithme de solution.
6. Solution du modèle mathématique.
7. Visualisation et interprétation des résultats.

III.3 Présentation du code Fluent :

III.3.1 Définition :

Gambit et Fluent sont des logiciels, sous licence commerciale, permettant de réaliser des simulations 2D ou 3D en mécanique des fluides allant de la construction du maillage avec Gambit à la résolution des équations de Navier-Stokes et au post-traitement avec Fluent. Les deux logiciels sont largement répandus dans l'industrie (automobile, aéronautique, espace, etc...) en raison de leur interface graphique puissante et de l'abondance de leurs options. Ils permettent de réaliser des simulations sur tous types de géométries complexes (fixes ou mobiles) associées à des maillages fixes ou adaptatifs [46].

Pour résoudre des problèmes en mécanique des fluides par les logiciels Fluent et Gambit, on doit, d'une manière générale, suivre les étapes montrées dans la figure III.4.

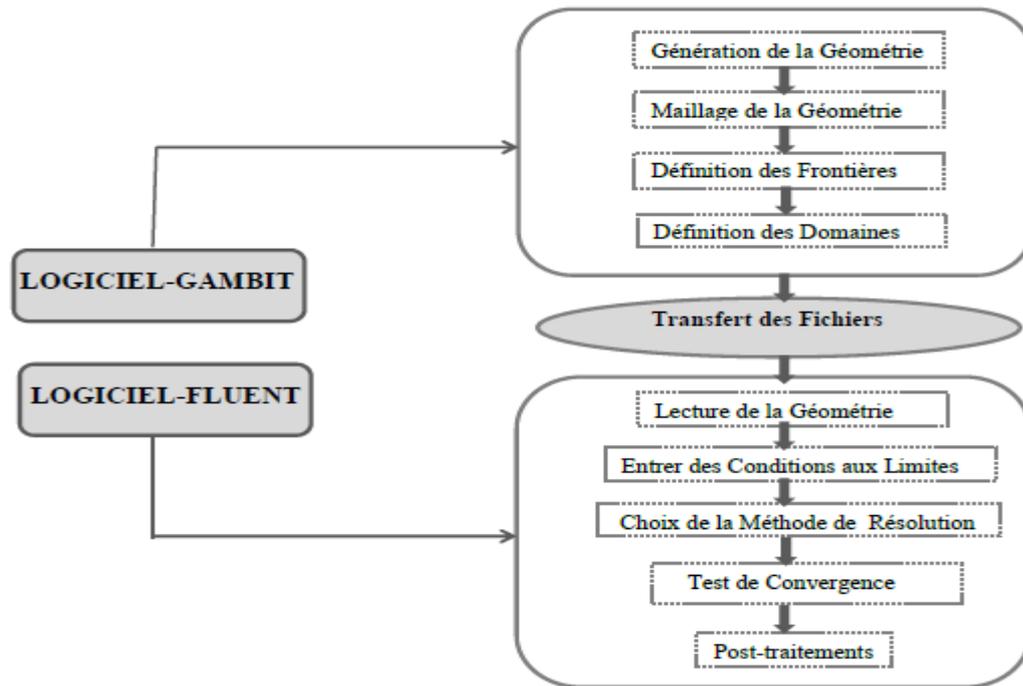


Figure III.4: Etapes à suivre pour contraindre un modèle numérique [46].

III.3.2 Maillage sous Gambit :

Le code Fluent utilise une grille pour la résolution des équations du système considéré. Cette grille est conçue à l'aide du mailleur Gambit. Celui-ci permet de générer deux types de maillages de calcul, structurée ou non structurée et de proposer des solutions étendues pour la création des géométries les plus compliquées [48].

III.3.2.1 Menu géométrie :

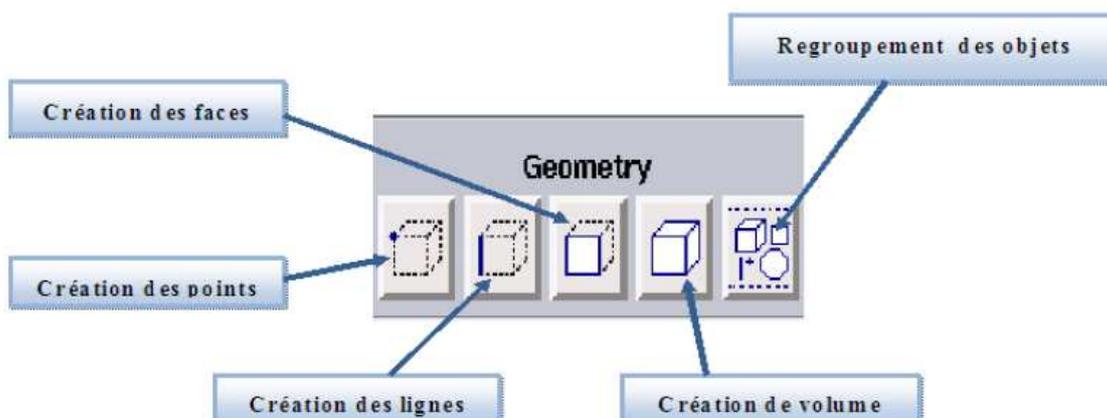


Figure III.5 : menu de géométrie.

III.3.2.2 Menu mesh (maillage) :

La génération du maillage (2D ou 3D) est une phase très importante dans une analyse CFD vu l'influence de ses paramètres sur la solution calculée.

• **GAMBIT** : permet de mailler automatiquement suivant plusieurs types de maillage, et suivant différents algorithmes. La géométrie doit être préparée au préalable.

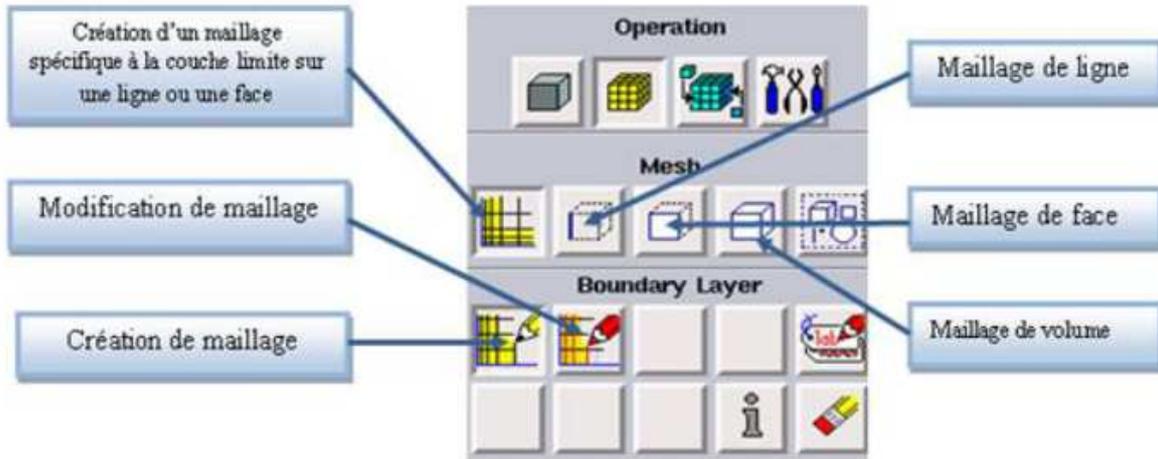


Figure III.6 : Menu de Maillage.

III.3.2.3 Choix du type de maillage :

- **Maillage structuré (quadra / hexa) :**

Il est beaucoup plus facile de le générer en utilisant une géométrie à multi bloc, il présente les avantages suivants [48] :

- ✓ Economique en nombre d'éléments, présente un nombre inférieur de maille par rapport à un maillage non structurée équivalent.
- ✓ Réduit les risques d'erreurs numériques car l'écoulement est aligné avec le maillage.

Et ses inconvénients sont :

- ✓ Difficile à le générer dans le cas d'une géométrie complexe.
- ✓ Difficile d'obtenir une bonne qualité de maillage pour certaines géométries complexes.

- **Maillage non structuré (Tri/tétra) :**

Les éléments de ce type de maillage sont générés arbitrairement sans aucune contrainte quant à leur disposition. Ses avantages :

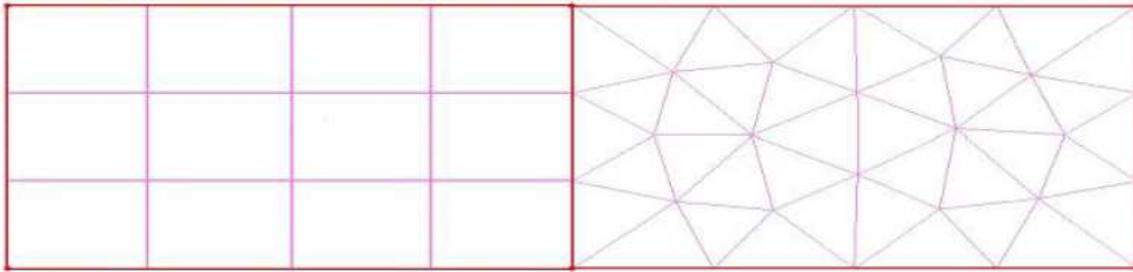
- ✓ Peut être généré sur une géométrie complexe tout en gardant une bonne qualité des éléments.

✓ Les algorithmes de génération de ce type de maillage (Tri/tétra) sont très automatisés.

Ses inconvénients :

✓ Très gourmand en nombre de mailles comparativement au maillage structuré.

✓ Engendre des erreurs numériques (fausse diffusion) qui peuvent être plus importante si l'on compare avec le maillage structuré.



Maillage structuré

Maillage non structuré

Figure III.7: Type de Maillage.

❖ **Maillage hybride :**

Maillage généré par un mélange d'éléments de différents types, triangulaires ou quadrilatéraux en **2D**, tétraédriques, prismatiques, ou pyramidaux en **3D**, ses avantages sont combinés entre les avantages du maillage structuré et ceux du maillage non structuré.

Dans notre étude, le maillage du domaine de calcul est donné par la figure III.5.

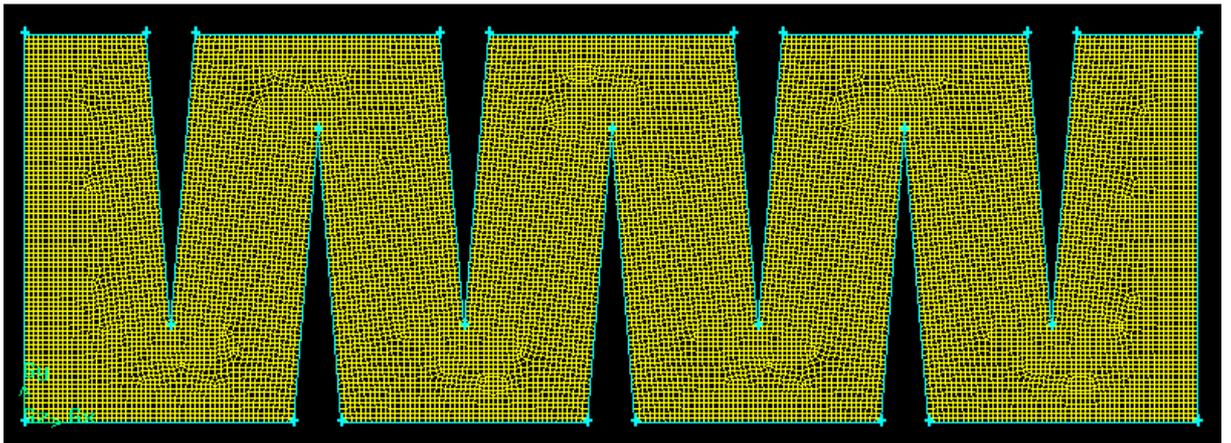


Figure III.8: Le maillage de notre étude.

❖ **Techniques générales de générations du maillage :**

Pratiquement, il n'existe pas de règle précis pour la création d'un maillage valable, cependant il existe différentes approches qui permettent d'obtenir une grille acceptable.

- Nous pouvons résumer ces règles dans ce qui suit :
- ✓ Maintenir une bonne **Qualité** des éléments.
- ✓ Assurer une bonne **Résolution** dans les régions à fort gradient.
- ✓ Assurer un bon **Lissage** dans les zones et les parties à maillage grossier.
- Minimiser le nombre **Total** des éléments (Temps de calcul raisonnable).

❖ **Qualité d'un maillage :**

La génération d'une très bonne qualité de maillage est essentielle pour l'obtention d'un résultat de calcul précis, robuste et signifiant ; et pour la précision de la solution et surtout sur le temps de calcul.

❖ **Lissage :**

Le changement dans la taille des éléments de maillage d'une zone maillée à une autre doit être graduel, la variation de la taille des éléments de deux zones adjacentes ne doit pas dépasser 20%.

❖ **Nombre total d'éléments :**

Un nombre important d'éléments de maillage permet sans doute d'améliorer la précision des calculs, mais pénalise les ressources informatiques en terme de mémoire et alourdit le système.

III.3.2.4 Maillage s'une surface :

Gambit offre diverses possibilités pour mailler une surface. Ce logiciel de conception permet aussi de choisir les types de maillages des faces suivants :

Tableau III.1 : « Schéma de génération des cellules [45] ».

| Option | Description |
|---------------------|--|
| Map | Crée une grille régulière et structurée des éléments du maillage |
| | Divise une face en régions de façon à leur appliquer Map |
| Submap | Crée une grille non structurée des éléments du maillage |
| Pave | Divise une face en trois régions quadrilatérales et crée un |
| Triprimitive | maillage tracé dans chaque région de la face |

Dans la présente étude, le schéma Map pour générer un maillage structuré régulier est retenu.

Ce schéma exige que le nombre des intervalles (ou des nœuds) dans les arrêtes opposées soit identique (Figures III.9.a et III.9.b).

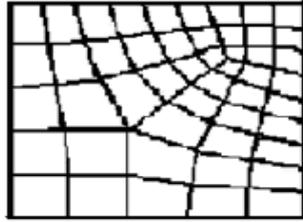


Figure III.9.a: Grille obtenue par, un schéma Pave

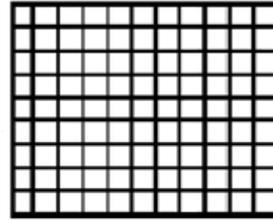


Figure III.9.b: Grille obtenue par un schéma Map.

III.3.2.5 Maillage multi-domaine :

Le maillage multi-domaine consiste à diviser la surface à mailler en plusieurs domaines (Figure III.10). Cette technique permet de raffiner le maillage dans les zones où des phénomènes physiques se développent loin ou près de l'obstacle. Elle permet aussi de bien redresser la grille afin d'éviter la déformation des mailles dans les zones courbées (arrondie, pente, etc... qui conduit à la création de la validité des résultats. Elle permet également de changer le type des cellules (de quadrilatères aux triangulaires et vis versa).

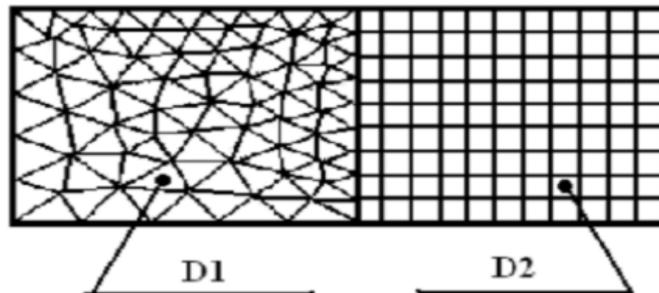


Figure III.10 : Grille obtenue par un maillage multi-domaine [49].

III.3.2.6 Maillage par interfaces :

La technique de maillage par interfaces consiste à superposer deux arêtes ayant la même dimension et un nombre d'intervalles différent, en les définissant comme des interfaces dans les conditions aux limites. De cette manière les domaines adjacents qui ont les mêmes dimensions n'auront pas la même grille (Figure III.11).

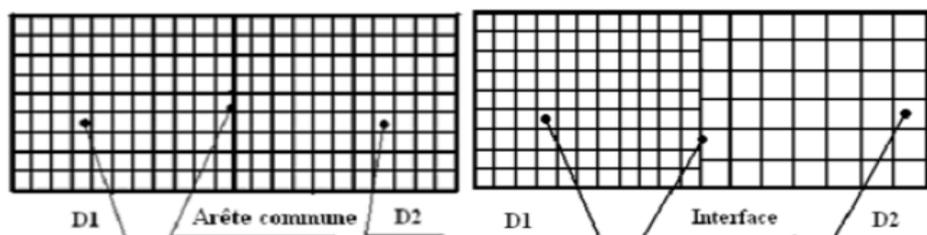


Figure III.11 : Grille obtenue par un maillage multi-domaines en utilisant une interface (sur la droite) [49].

III.3.2.7 Définition des frontières:

Sélectionner dans le menu « Solver » le type du solveur « FLUENT5/6 » puis définir les frontières.

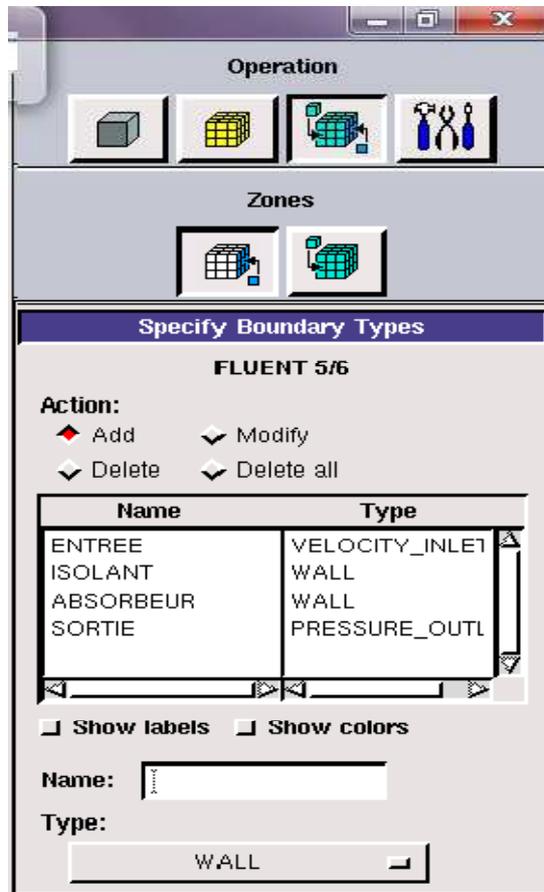


Figure III.12 : Définition des frontières.

III.3.2.8 Exportation du maillage :

Le maillage peut être alors exporté dans un fichier pour lecture avec FLUENT.

File → **Export** → **Mesh**



Figure III.13 : Exportation du maillage.

Donner un nom au fichier et sélectionner le maillage “2-D”, puis sauvegarder le fichier Gambit : **File** → **Save As**

III.4 Présentation du Fluent :

III.4.1 Importation de la géométrie :

Pour commencer la simulation il faut importer le fichier (*.msh) généré sous Gambit.

File → Read → Case...

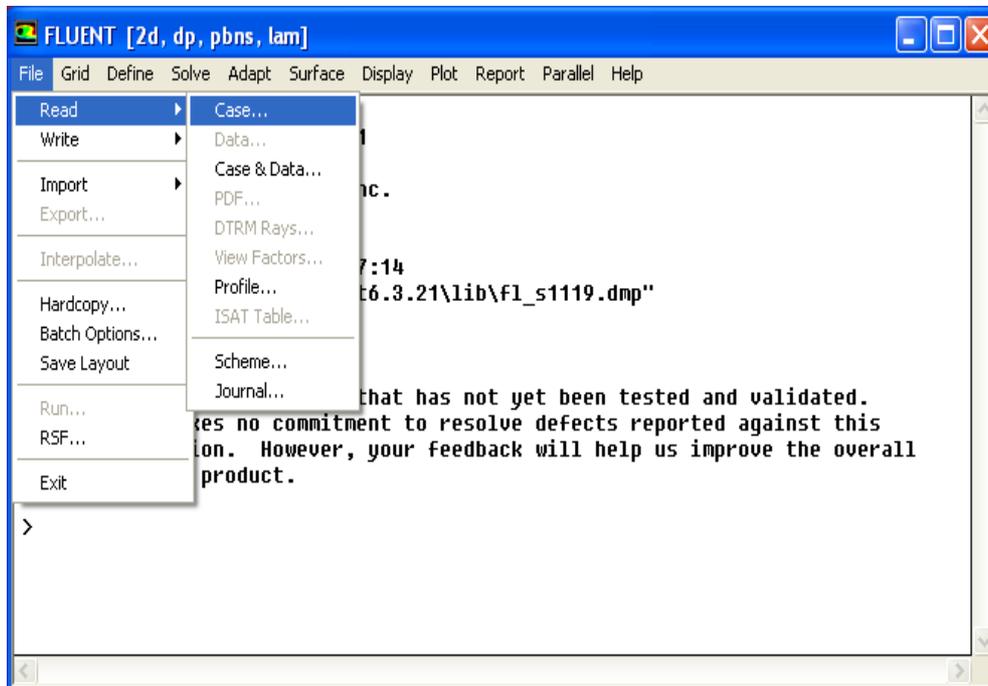


Figure III.14 : Importation de la géométrie.

III.4.2 Vérification du maillage importé :

Grid → Check

Ceci permet de vérifier si le maillage importé ne contient pas d'erreurs ou de volumes négatifs.

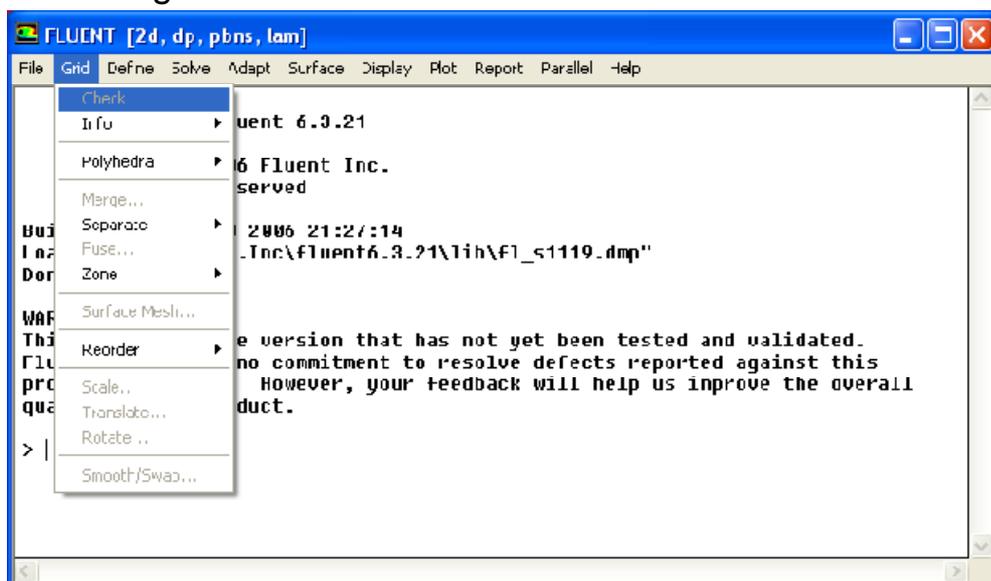


Figure III.15 : Vérification du maillage.

III.4.3 Vérification de l'échelle :

Grid → **Scale**

Il faut toujours vérifier que les dimensions affichées correspondent aux dimensions physiques du problème.

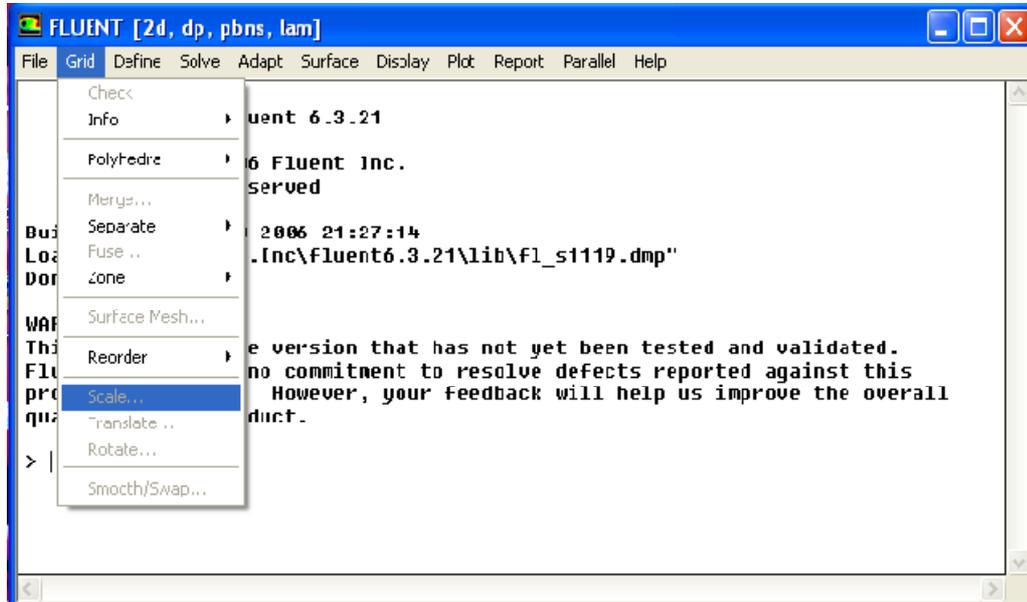


Figure III.16: Vérification des unités.

III.4.4 Choix du solveur :

Define → **Models** → **Solver...**

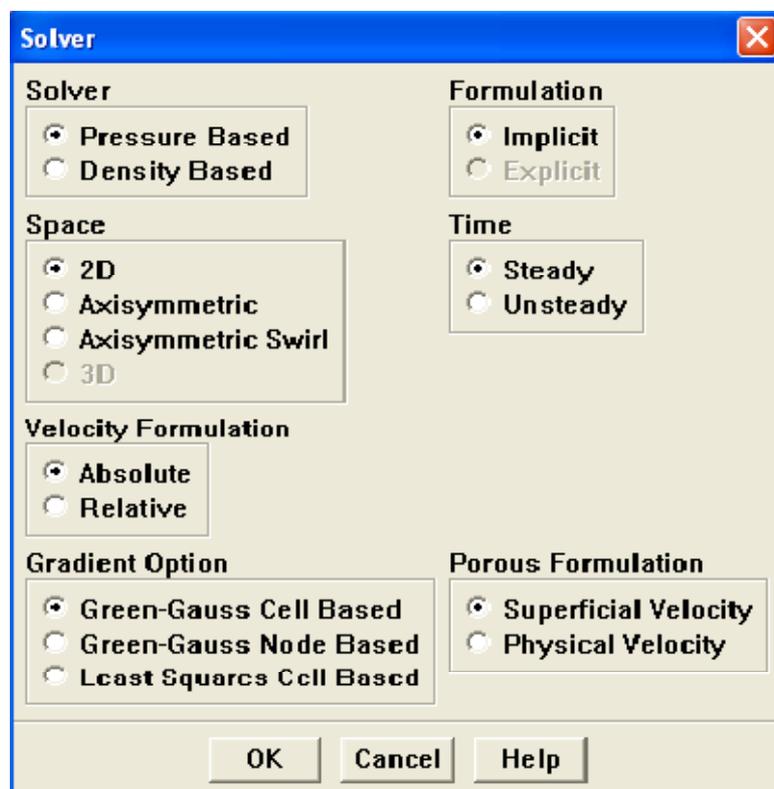


Figure III.17 : Choix du solveur.

- Segregated Solver : est le plus approprié pour les écoulements incompressibles (Ventilateurs, pompes...)
- Coupled Solvers, les solveurs «coupled implicit» et «coupled explicit», sont plutôt réservés aux écoulements compressibles à grande vitesse.

C'est là aussi qu'on choisit le régime d'écoulement ; permanent ou instationnaire [49].

III.4.5 L'équation de l'énergie :

Define → **Models** → **Energy...**

L'instruction énergie doit être activée pour l'étude du champ thermique.

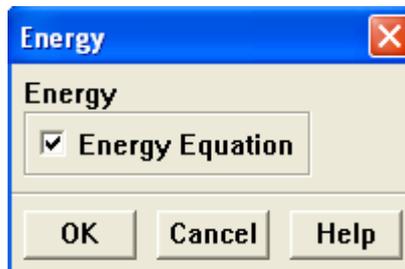


Figure III.18 : Equation de l'énergie.

III.4.6 Choix du modèle de turbulence :

Define → **Models** → **Viscous**

Fluent propose différentes modélisations de l'écoulement turbulent. Parmi lesquels les écoulements non visqueux, laminaires, turbulents ... etc.

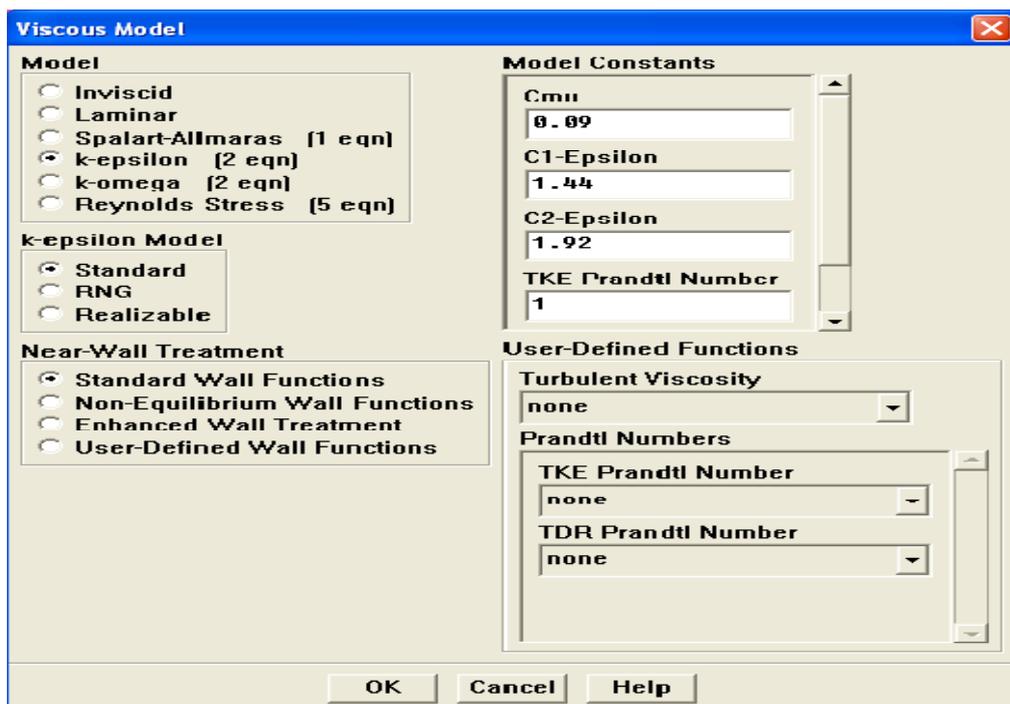


Figure III.19: Choix du modèle de turbulence.

III.4.7 Définition des caractéristiques du fluide :

Define → **Materials**

Les caractéristiques du fluide sont chargées à partir de la bibliothèque de données de Fluent.

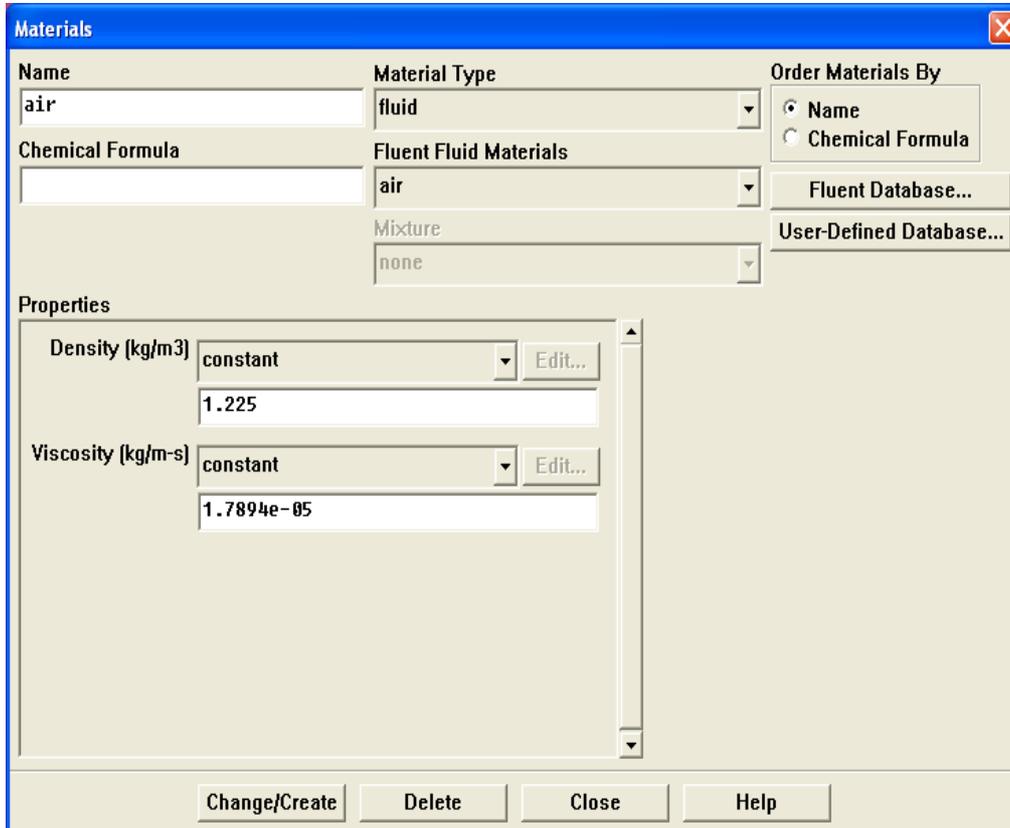


Figure III.20 : Définition des caractéristiques du fluide.

III.4.8 Operating conditions:

Define → **Operating** → **conditions**

Avant de choisir les conditions aux limites, il faut choisir d'abord la valeur de la pression de référence « operating conditions ».

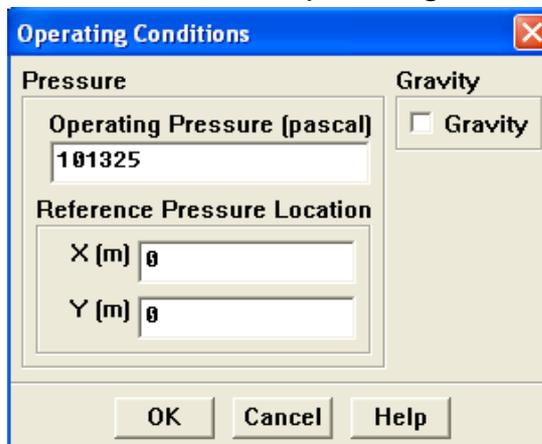


Figure III.21: Choix de la pression de référence.

III.4.9 Conditions aux limites :

Define Boundary Conditions

Ensuite, il faut fixer les valeurs des conditions aux limites.

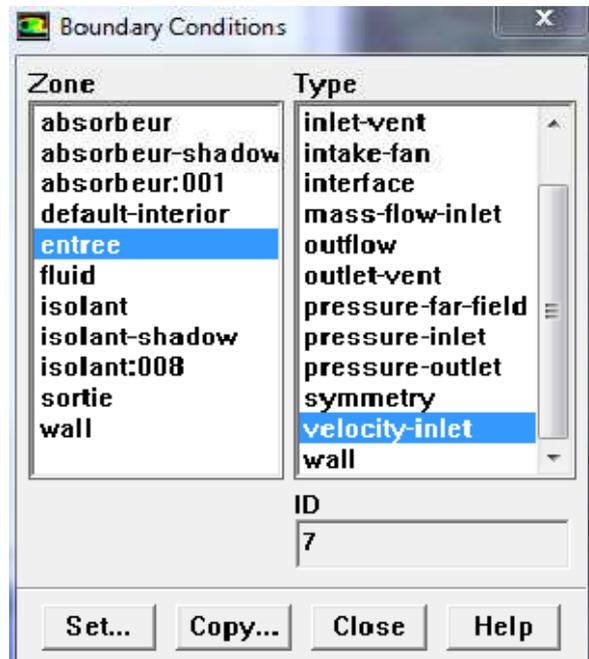


Figure III.22 : Valeurs des conditions aux limites.

❖ Velocity inlet :

Utilisée pour des écoulements incompressibles ou moyennement compressibles, quand la vitesse d'entrée est connue.

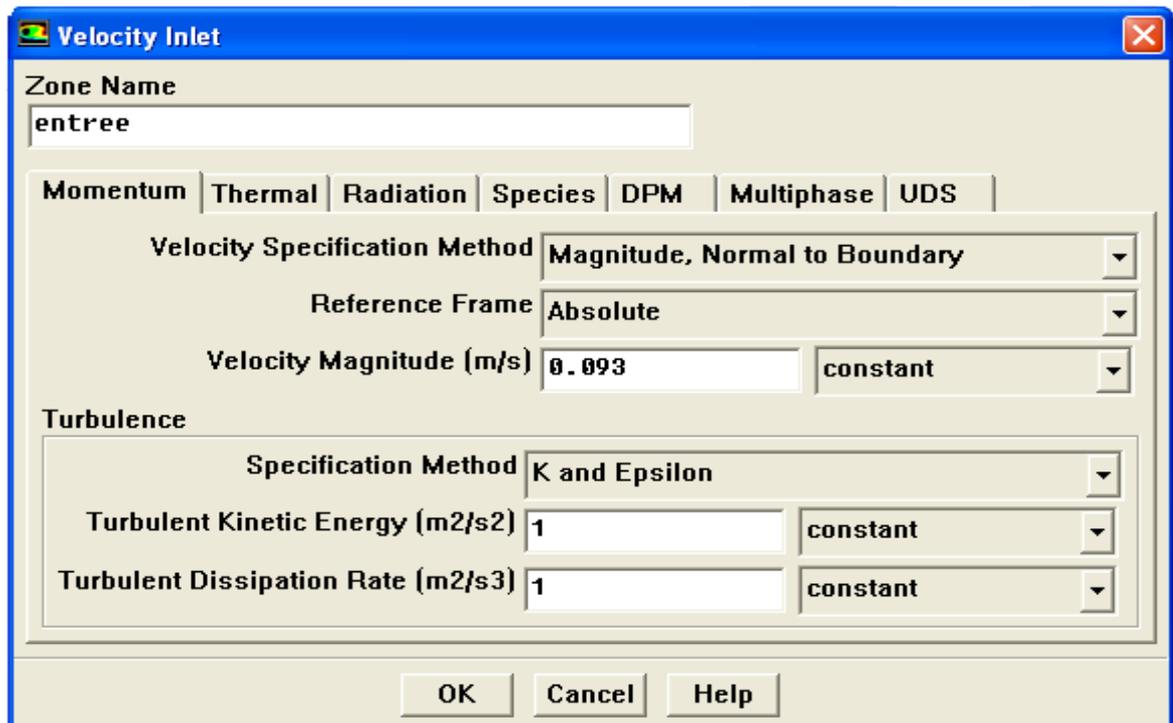


Figure III.23: Vitesse d'entrée.

❖ **Wall :**

Il est utilisé pour délimiter les régions solides des régions fluides.

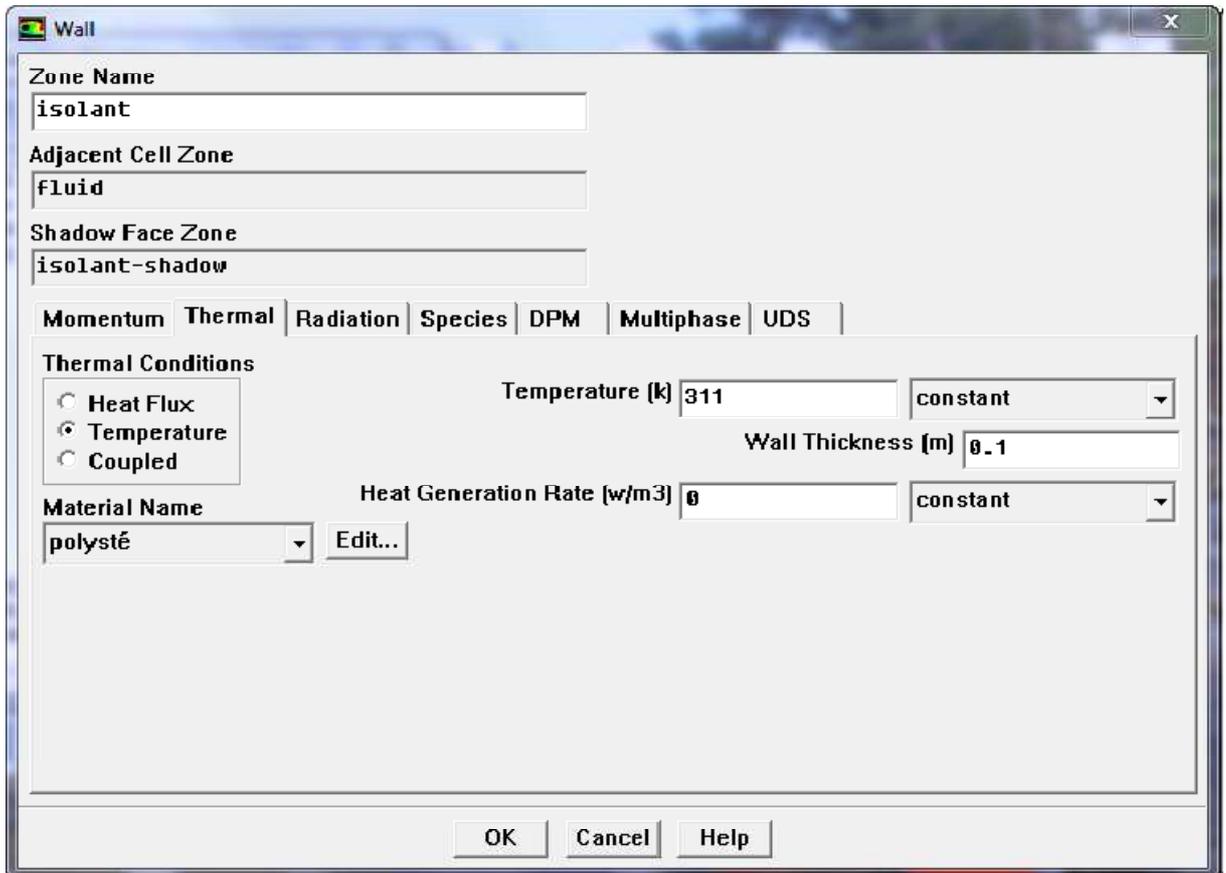


Figure III.24 : Parois inférieure et supérieure.

❖ **Pressure Outlet :**

Spécifie la pression statique de sortie.

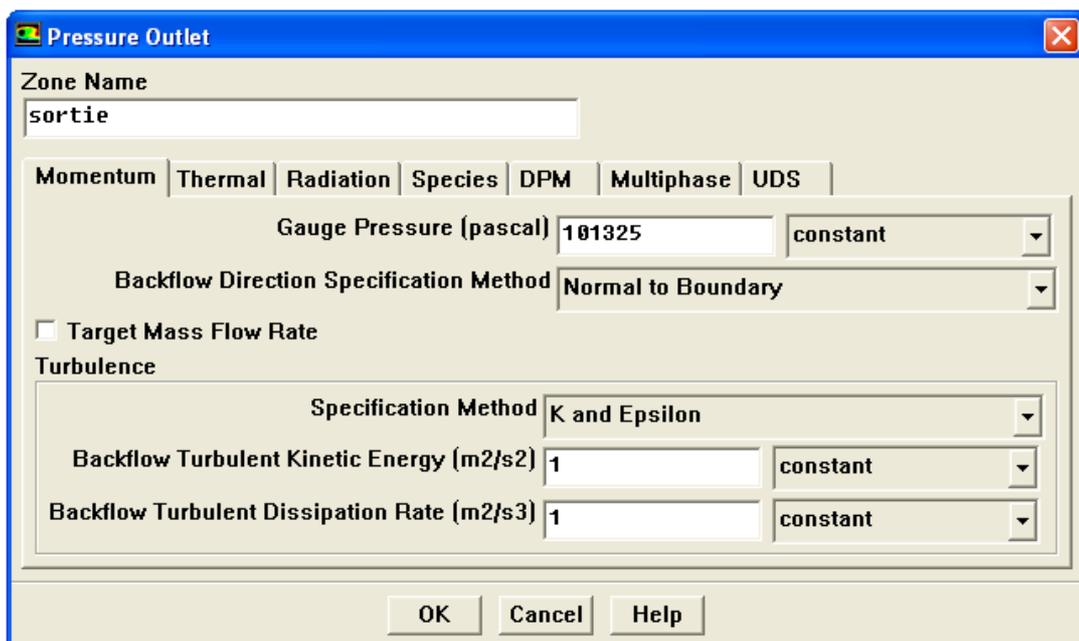


Figure III.25 : Pression à la sortie.

III.4.10 Choix d'ordre des équations et l'algorithme :

Solve → **Controls** → **Solution...**

Ceci permet de spécifier le degré d'ordre des équations à résoudre, ainsi l'algorithme.

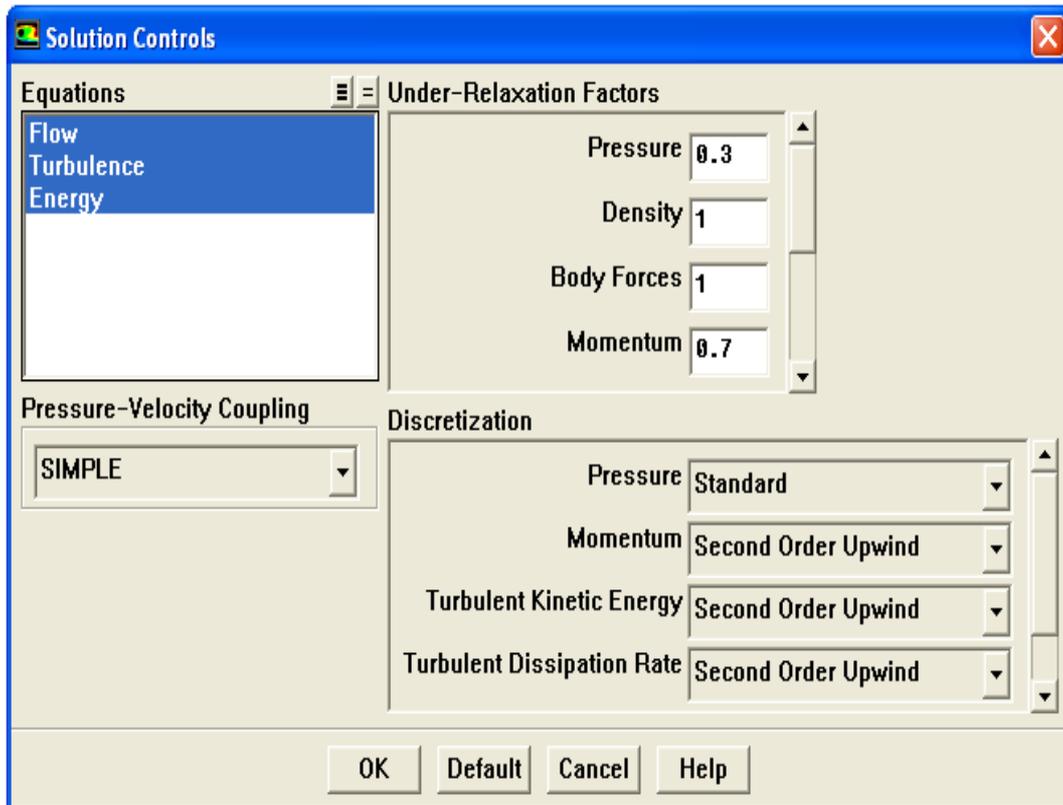


Figure III.26 : Choix d'ordre des équations et l'algorithme.

III.4.11 Initialisation:

Solve → **Initialize** → **Initialize...**

Cette fonction permet d'initialiser le calcul.

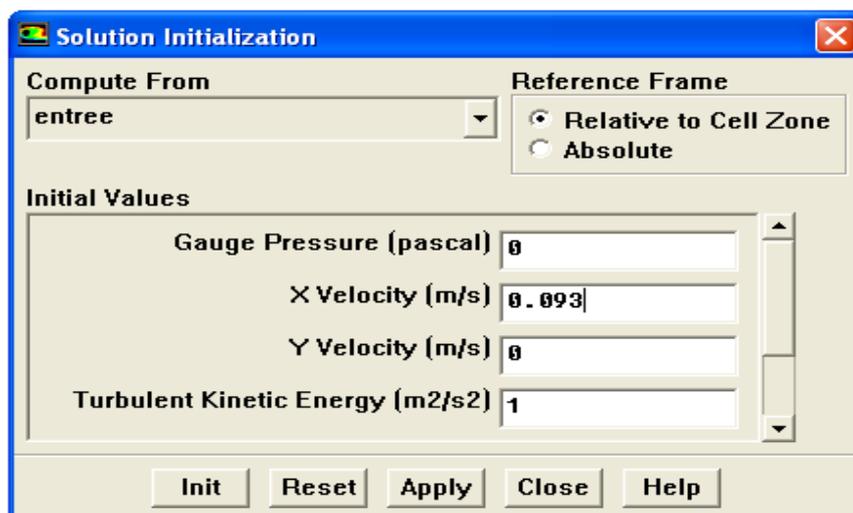


Figure III.27 : Initialisation du calcul.

III.4.12 Choix des critères de convergence :

Solve → **Monitors** → **Residual...**

Il s'agit ici de choisir les critères qui doivent être vérifiés pour que les calculs de la simulation s'arrêtent.

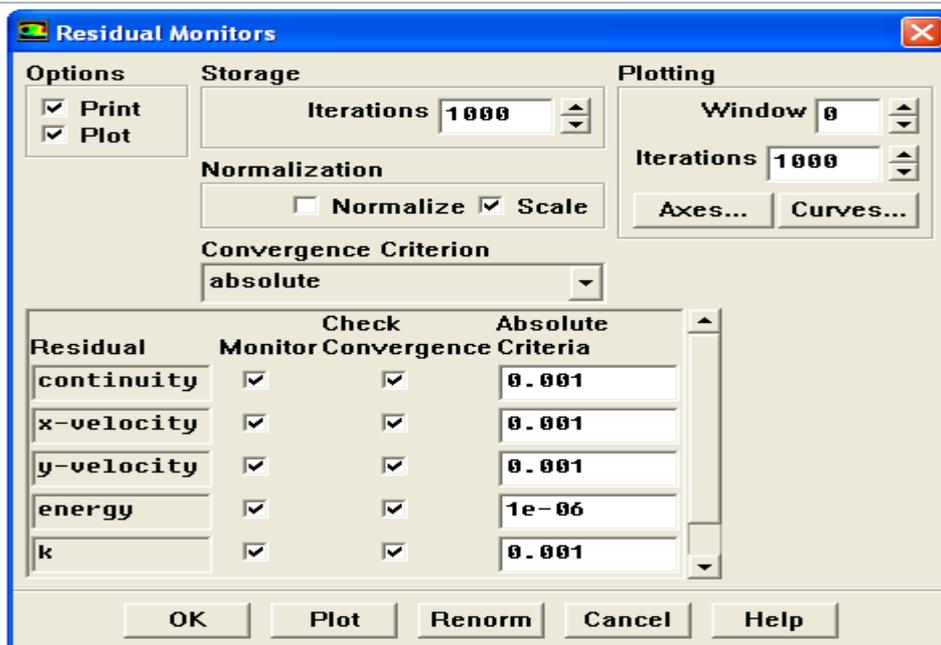


Figure III.28 : Choix des critères de convergence.

Pour afficher la convergence à l'écran pendant les calculs sous forme d'un graphe, il faut activer l'option Plot. Il est possible de désactiver certains critères d'arrêt de la simulation en décochant la case de convergence [49].

III.4.13 Lancement du calcul :

Solve → **Iterate...**

Pour commencer les calculs il faut d'abord choisir le nombre des itérations.

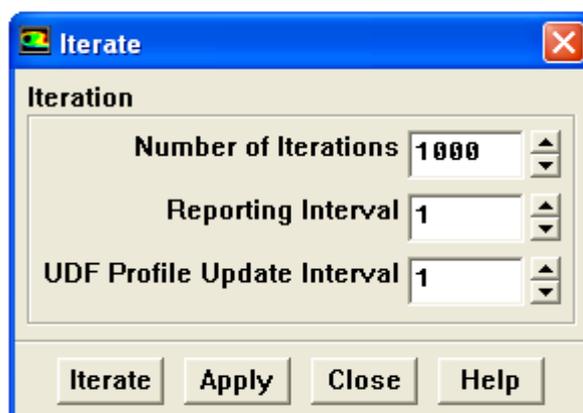


Figure III.29 : Choix du nombre des itérations.

La figure (III.30) montre la convergence de la solution. La précision de la convergence est nettement meilleure (10^{-6}).

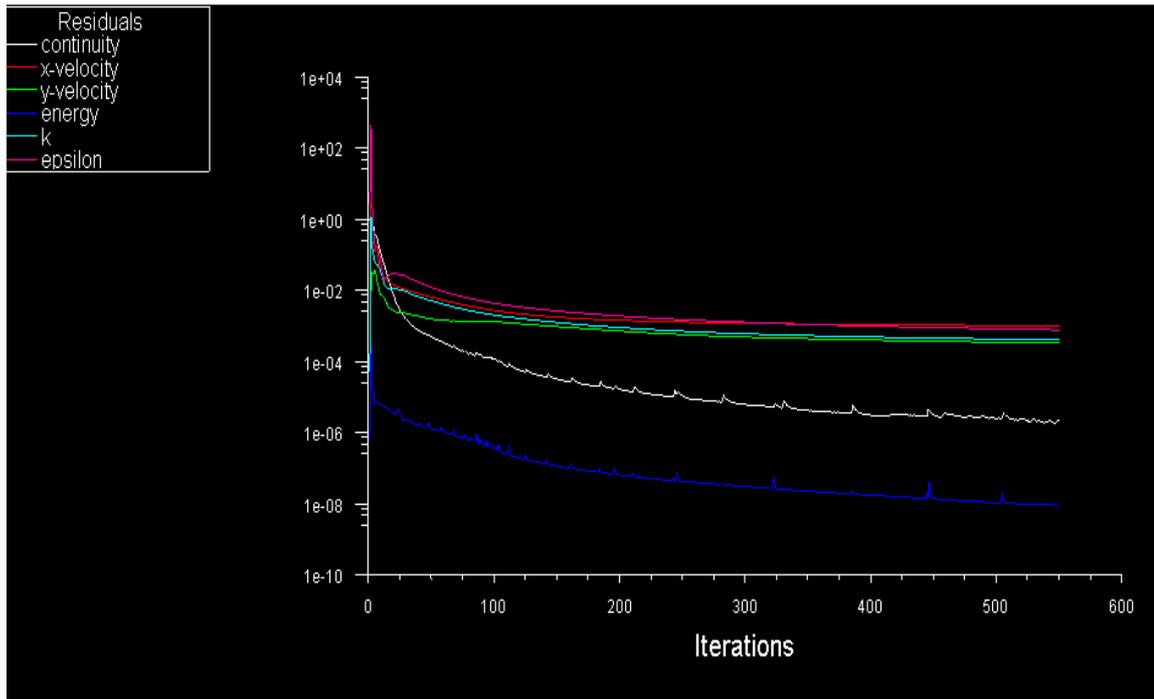


Figure III.30 : La convergence de la solution.

III.5 Présentation des problématiques :

Le principe de trois phases de la chaîne énergétique d'une maison solaire est représenté comme suit :

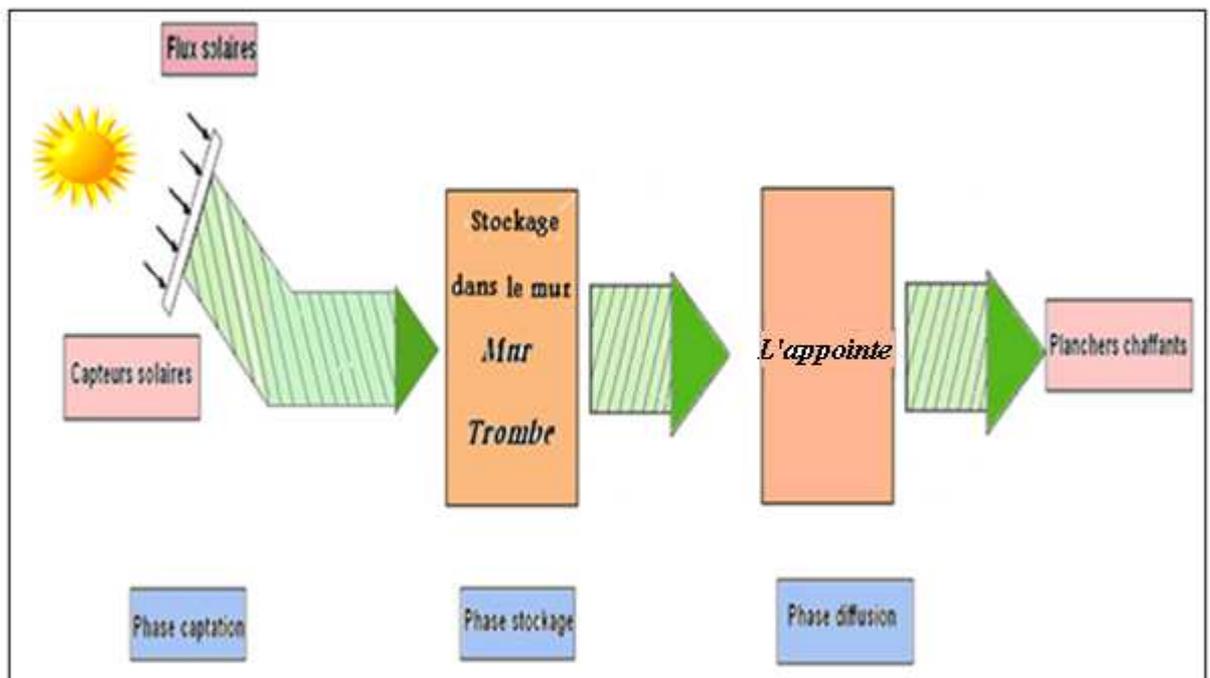


Figure III.31 : Schéma représentant les trois phases de la chaîne énergétique d'une maison solaire.

III.5.1 Stockage thermique :

III.5.1.1 Stockage sous terrain :

Mr : « Bourhaleb.H » (1987) [25], a étudié un système échangeur – stockeur de chaleur. Ce système est constitué par un échangeur de chaleur air – terre, enterré à différentes profondeurs, suivant la durée de stockage désirée.

Dans leur étude, l'échangeur est alimenté par un ensemble de capteurs solaires à air qui fournissent la chaleur principalement au printemps et en été. La chaleur se répartie dans la terre autour de l'échangeur enterrée à 1,80m de profondeur dans le jardin, constituant la source froide de la pompe à chaleur.

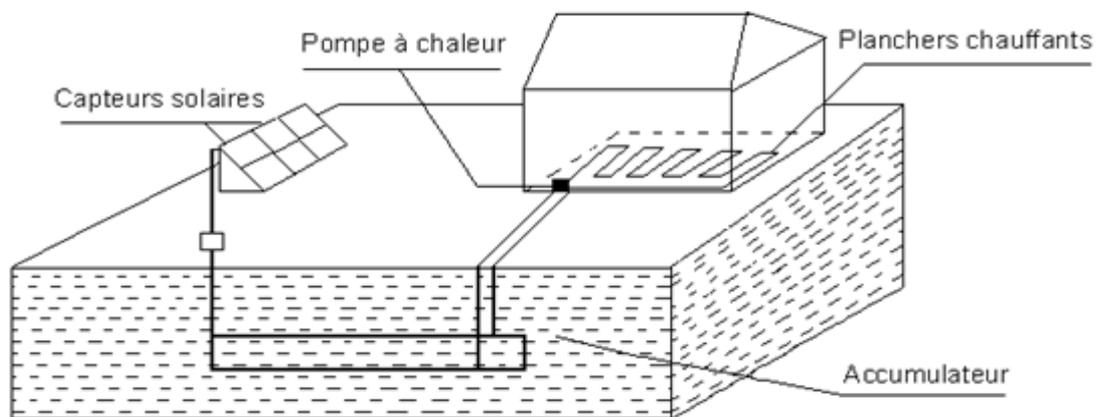


Figure III.32: Présentation Schématique du système [25].

Les caractéristiques de la maison solaire sont comme suit [25] :

✚ Les caractéristiques de la maison sont comme suit :

- Surface Habitable 185m²
- Volume Chauffe 430m³
- Besoins de Chauffage 14.31Kw
- Coefficient G=1

✚ Les caractéristiques de l'accumulateur :

- Longueur des travaux constituant l'échangeur 140m
- Profondeur du volume influence 2.40m
- Volume de l'accumulateur 1000m³
- Surface d'échange 40m²

✚ Les caractéristiques thermiques de la maison :

Une installation solaire repose sur les considérations suivantes :

- Besoins thermiques à satisfaire.
- Importance de l'installation solaire disponible.

- Une adaptation de ses ressources aux besoins.

Le calcul thermique de la maison solaire doit passer par une estimation des besoins en chauffage, et par la suite, l'estimation du coefficient de déperdition volumique (G).

❖ **Les besoins de chauffage dépendent :**

- Du lieu de construction.
- De la latitude.
- De l'altitude.
- De la végétation.
- Des vents dominants.
- Des qualités de la construction.

Pour simplifier le problème il considère essentiellement la variation mensuelle de la température extérieure.

La quantité de chaleur nécessaire à l'habitation sera définie en fonction des trois paramètres suivants :

- Coefficient G ;
- Température de non chauffage.
- Température d'air extérieur.

❖ **Coefficient de déperdition G :**

Le «G» d'un bâtiment est la quantité de chaleur cédée par unité de temps à l'extérieur par un m³ d'air contenu dans le bâtiment pour un degré d'écart entre l'intérieur du bâtiment et l'extérieur.

Il fait intervenir les différentes pertes à travers l'enveloppe. On distingue [7]:

- **Les pertes surfaciques :**

$$QS = \sum_i K (I) * S(I)(T_i - T_e) \quad (III.10)$$

K= Coef. de transmission surfacique calculé par :

$$K = \frac{1}{\frac{1}{h_i} + \frac{1}{h_e} + \sum_i^n Rn} \quad (III.11)$$

h_i et h_e sont des coef. de convection parois-air.

RN : est la résistance thermique de chaque paroi.

$$RN = \frac{\sum_i e(i)}{\sum_i \lambda(i)} \quad (III.12)$$

e : Épaisseur de la paroi.

λ : Sa conductibilité thermique.

S : Surface de la paroi.

- **Pertes linéiques :**

$$QL = \sum K (I) * L(I) \quad (III.13)$$

K : coef. de déperdition linéique.

L : sa longueur.

Le coef. G est composé de deux termes :

$$G = G1 + G2 \quad (III.14)$$

G1 : Représente les pertes thermiques à travers les parois.

$$G1 = \frac{(\sum Qs + \sum QL)}{V} \quad (III.15)$$

V = Volume habitable (m³).

G2 : Représente les pertes thermiques dues aux renouvellements d'air.

❖ **Calcul des déperditions par renouvellement d'air [25]:**

$$Dr = 0.34 * N * V(T_i - T_e) \quad (III.16)$$

N : taux de renouvellement d'air horaire.

V : volume habitable.

« Bourhaleb.H » (1987) [25], a utilisé un moyen simple qui est le « Puits Canadian » pour minimiser ces pertes.

Pour avoir de bons résultats, il convient d'utiliser une canalisation d'au moins 30 mètres de longueur.

Le coef. G2 est donné par la relation suivante :

$$G2 = \frac{Dr}{V} \quad (III.17)$$

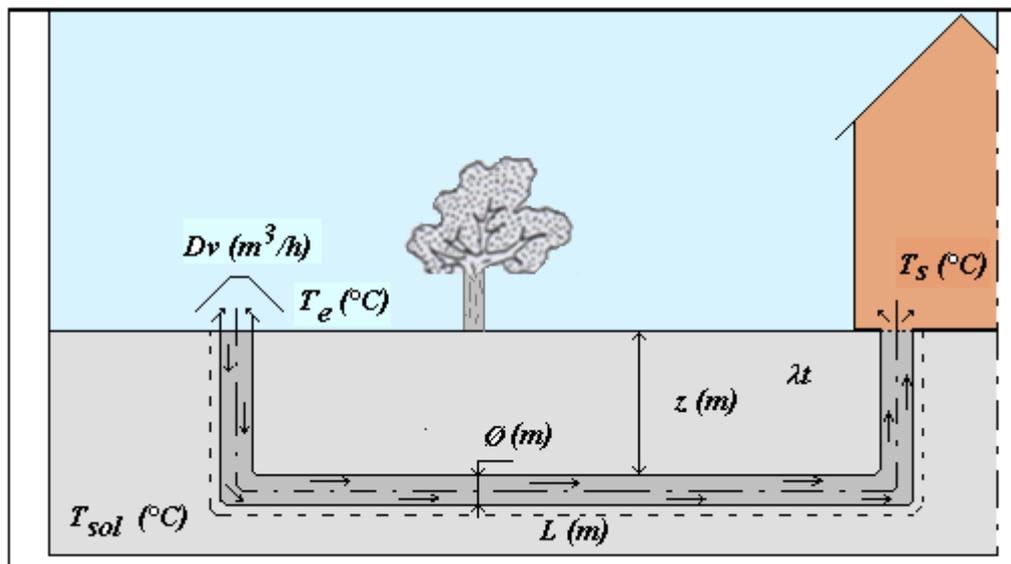


Figure III.33: La canalisation du chauffage de la maison solaire [25].

❖ **Température de non chauffage (TNC) [25]:**

C'est la température à partir de laquelle il n'est plus nécessaire de chauffer. Elle est fonction de la température de confort que l'occupant

désire avoir à l'intérieur. Des gains non négligeables dus aux activités des occupants, aux apports solaires par sa structure (, accumulation dans les murs ...) participent à une baie vitrée baisse de (TNC).

Les déperditions thermiques à compenser pendant la période chauffage durant une journée sont données par :

$$B = G * V(TNC - T_{ext}) * 24 \quad (III.18)$$

B : sont les besoins thermiques journaliers à fournir au système de chauffage pour maintenir la température de consigne.

Text : est la température moyenne journalière extérieure.

Pour connaître les déperditions annuelles, il faut calculer la somme des degrés-jour pour une température de non chauffage :

DUJ (Degré – Jour – Unifie)

$$DUJ = (TNC - Text) \quad (III.19)$$

$$G = G1 + G2 = 0.73 + 0.25 = 0.98 W/m^3°C$$

On prend :

$$G = 1 W/m^3°C \quad \text{Pour le calcul des besoins.}$$

Tableau III.2 : « Les besoins mensuels de l'habitation « Bourhaleb.H» (1987) [25]»:

| Mois | T_{ext} | DJ. B15 | DJ. B16 | DJ. B18 | Besoins B16 | Besoins |
|-----------|-----------|---------|---------|---------|-------------|---------|
| Janvier | 2.8 | 387.5 | 409.2 | 471.2 | 4223 | 4863 |
| Février | 3.6 | 333 | 347.2 | 403.2 | 3583 | 4161 |
| Mars | 6.2 | 273 | 303.8 | 365.8 | 3135 | 3775 |
| Avril | 8.7 | 177 | 219 | 279 | 1055 | 2879 |
| Mai | 12.7 | 80.5 | 102.3 | 164.3 | 124 | 1695 |
| Juin | 15.6 | ----- | 12 | 72 | ----- | 743 |
| Juillet | 17.2 | ----- | ----- | 24.8 | ----- | 256 |
| Aout | 17.3 | ----- | ----- | 21.7 | 402 | 224 |
| Septembre | 14.7 | ----- | 39 | 99 | 402 | 1021 |
| Octobre | 10.4 | 133.3 | 173.6 | 235.6 | 1791 | 2431 |
| Novembre | 5.9 | 201 | 303 | 363 | 3127 | 3746 |
| Décembre | 3.5 | 365.5 | 387.5 | 449.5 | 3999 | 4639 |

❖ **Aspects architecturaux:**

C'est une maison traditionnelle de forme simple avec toiture à deux versants, construite sur terre pleine, cave au sous sol, un niveau avec combles aménagés qui est à usage d'habitation.

Tableau III.3 : « Caractéristiques thermiques des parois et déperditions [25]».

| Parois | Nature | Epaisseur | Coef de déperdition |
|---------------------|--------------------|-----------|----------------------------|
| Mur extérieur | - Briques pleines | 0.22 | 0.33 (W/m ² °C) |
| | - Polyuréthane | 0.07 | |
| | - Carreaux plâtres | 0.07 | |
| Plancher | - hourdis béton | 0.12 | 0.5 |
| | - Chappe | 0.04 | |
| | - polystyrène | 0.04 | |
| | - dalle | 0.07 | |
| | - carrelage | 0.05 | |
| Plafond sous comble | - Laine de verre | 0.15 | 0.22 |
| | - plâtre | 0.02 | |

Déperditions par renouvellement d'air et infiltration : $G=0.23$.

Déperditions totales : $G=1.15\text{W/m}^3\text{°C}$.

❖ **Besoins de la maison :**

Le calcul de la quantité de chaleur nécessaire à fournir est de 14310W soit 77.3W/m² habitable ou 33.2W/m³ chauffé.

• **Répartition :**

- Sous sol total : 104m² service.
- Rez de chaussée : 95m² habitables.
- Comble aménagé : 89.5m² habitables.

Un total de 185m² habitables ou 430m³ chauffés.

Selon les études expérimentales réalisées par Bourhaleb.H (1987) [25] sur le stockage sous terrain par pompe à chaleur de trois ans de durée.

La température moyenne du sol au voisinage du capteur est de 10°C, la température extérieure de 15°C.

La température ambiante du local à chauffer s'est stabilisée après une montée en température relativement rapide.

Les températures d'eau au niveau de la pompe à chaleur est de 10.5°C à l'entrée et de 9°C à la sortie de l'évaporateur, 26°C à l'entrée et 24°C à la sortie du condenseur, ce qui donne un coefficient de performance instantané pendant le démarrage voisin de 4 [25].

La pompe à chaleur possède un C.O.P. instantané de l'ordre de 3.8 en fin de période très froide. La température moyenne au niveau du capteur enterré n'ayant subi qu'une chute de 3°C par rapport à la température de référence [25].

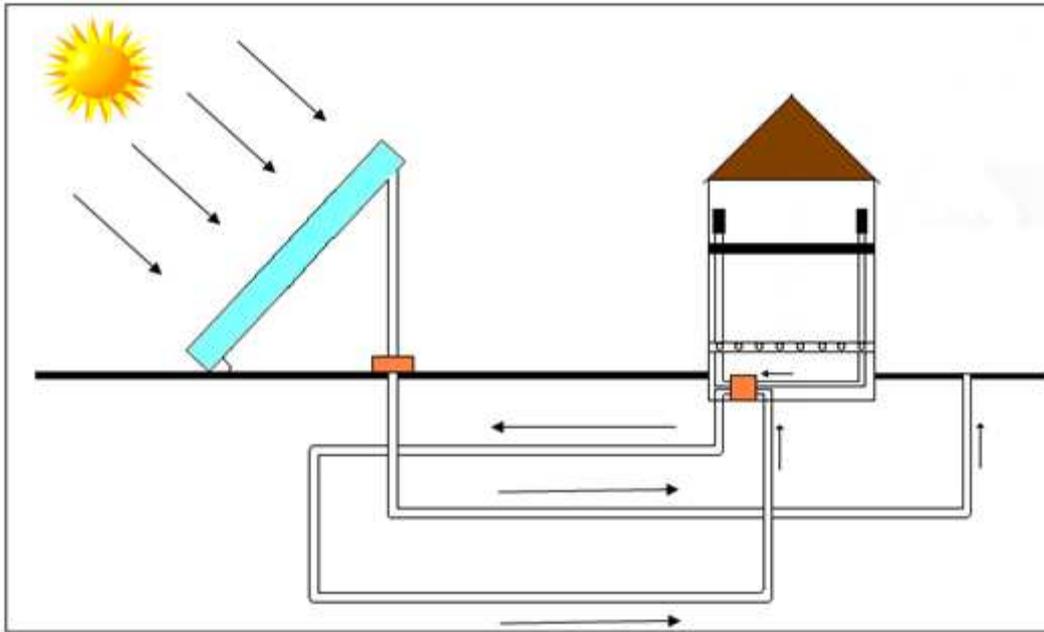


Figure III.34: Schéma le stockage souterrain de la maison solaire étudiée par Bourhaleb.H [25].

➤ **Les résultats de stockage dans le sol [25]:**

- **La 1^{ère} année se l'expérimentation :**

L'expérimentation a débuté en octobre avec une seule pompe à chaleur qui fonctionne, en puisant ses calories dans le sol.

Les capteurs solaires n'étaient pas encore installés. Au bout de trois mois de fonctionnement, la température dans le stockage a passé de 9°C à (-3.5°C) qui est le point critique du fonctionnement de la pompe à chaleur. Le sol ne peut plus satisfaire les besoins de la pompe à chaleur, donc une interruption du fonctionnement de celle-ci.

Par contre les autres sondes indiquent une température variant entre 0.5 et 2.5°C.

- **La 2^{ème} année d'expérimentation :**

Le système fonctionne dans son exemple, les capteurs solaires ont régénéré le sol, la température dans le stockage à la même période que l'année précédente est de 0.5°C au lieu de (-3.5).

Un gain en température de 4°C apporté par la régénération du sol avec les capteurs solaires, malgré que les températures extérieures étaient plus basses cette année.

- **La 3^{ème} année d'expérimentation :**

La température enregistrée à la même époque était de 4°C un gain encore de 3.5°C par rapport à la 2^{ème} année d'expérimentation.

On constate qu'il y a une évolution de température dans le stockage d'une année à l'autre, ceux-ci est due à la fiabilité et l'efficacité du système, complété par l'apport des capteurs solaires.

III.5.1.2 Mur Trombe :

Dans notre étude, le stockage de la chaleur est ce fait au moyen du mur Trombe, le déphasage dans le temps entre les apports et les besoins de chauffage nous a conduit à étudier un système de mur Trombe (selon le nom de l'inventeur, l'ingénieur français Félix Trombe).

Ce schéma est représenté dans la figure suivante :

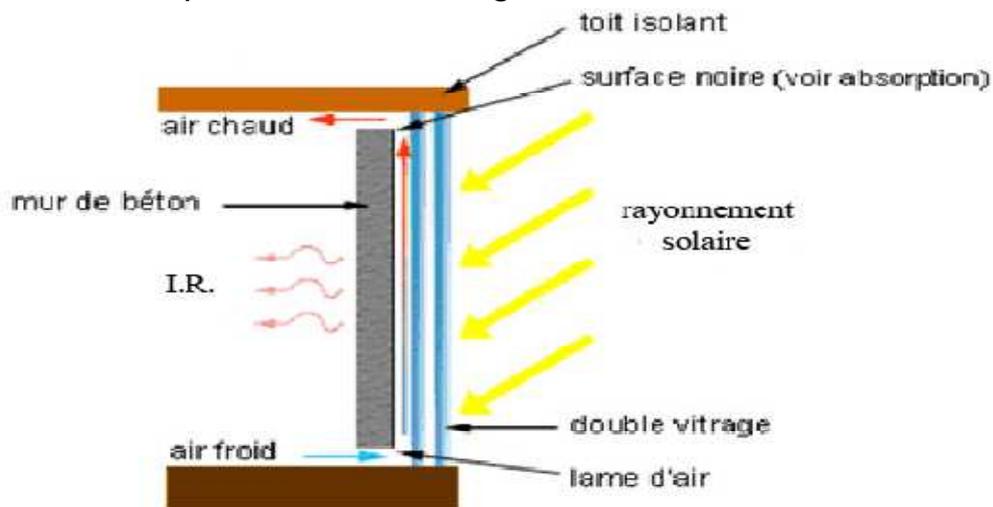


Figure III.35: Mur Trombe [23]

III.5.1.2.1 Schéma de principe du mur Trombe :

Le principe de fonctionnement d'un mur capteur est simple, il s'agit d'emmagasiner la chaleur au cours de la journée pour ensuite la restituer pendant la nuit.

Ce type de mur est directement incorporé aux murs d'une maison et permet d'apporter de la chaleur gratuite à une pièce. On place obligatoirement ces murs au sud pour avoir le meilleur rendement. La nature du matériau du mur capteur est primordiale. Des matériaux à forte inertie sont nécessaires pour stocker les apports solaires; on utilise surtout des briques de terre comprimée [22].

Un vitrage est placé devant le mur afin de créer un effet de serre, on choisit surtout un double vitrage pour limiter les pertes de chaleur nocturnes.

Le mur capteur comporte des ouvertures qui permettent un échange entre l'air de la pièce et l'air contenu entre le vitrage et le mur. Mais lorsque l'ensoleillement n'est pas suffisant, il se produit l'effet inverse,

et l'air se refroidit. Pour éviter ce phénomène, on place des clapets sur les ouvertures que l'on renferme lorsqu'il n'y a pas de soleil. Le chauffage est réalisée donc par deux manières différentes; par convection, grâce à la circulation de l'air, et par rayonnement, grâce au déphasage du mur [22].

III.5.2 Captation :

L'énergie solaire représente un avantage considérable, même notre existence en dépend mais l'inégalité de répartition géographique constitue un handicap. Les régions qui reçoivent la plus grande quantité de rayons solaires sont celles où les besoins thermiques, surtout dans l'habitat sont les plus réduits.

Pour illustrer cette constatation, « Bourhaleb.H » (1987) [25] considère l'exemple suivant :

• Région côtière de province :

Une énergie de 15Kwh par m² et par an reçue sur une surface horizontale, une telle énergie, sous forme thermique serait obtenue à partir de 18,5 tonnes de charbon ou 16000 litres de Fuel. Cela signifie qu'une maison familiale moyenne reçoit sur son toit « surface 100m² » l'équivalent énergétique de 18,5 tonnes de charbon ou 16000 litres de fuel.

L'énergie solaire contribue donc à l'amélioration de bilan des dépenses énergétiques et peut occuper une place importante aussi bien dans l'économie de chaque famille qu'à l'échelon national.

III.5.2.1 Expérience du « Bourhaleb.H » (1987) [25] :

Bourhaleb.H à étudié expérimentalement au laboratoire sur quatre capteurs solaires plans sans chicanes et avec chicanes dans les conditions suivantes, Trois sortes de vitrages ont été utilisées pour cette expérimentations :

- Verre ordinaire ;
- Plexiglas ;
- Polycarbonate double parois.

Seulement l'absorbeur de chaque capteur est différent.

III.5.2.1.1 Capteurs sans chicanes :

Les conditions d'expérimentations sont :

- Température extérieure variant de 7 à 9°C.
- Flux solaire variant de 570 à 650W/m².
- Durée d'expérimentation 1heure 5mn.

Première expérience :

Dans la première expérience Bourhaleb.H a utilisé la couverture transparente verre un seul vitre.

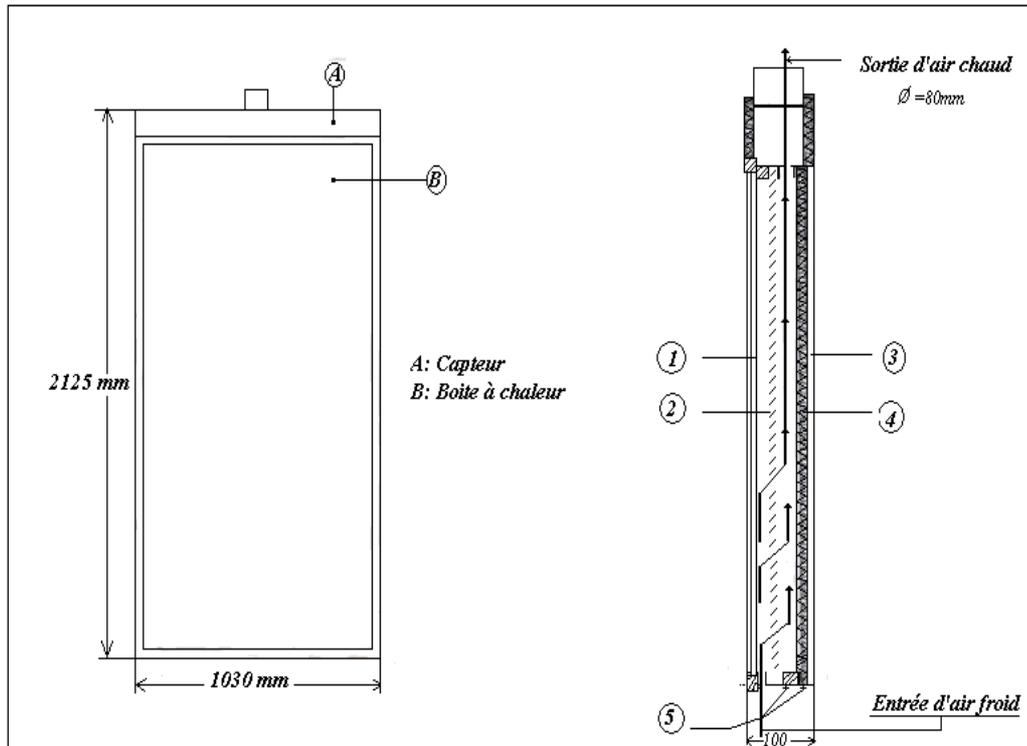


Figure III.36 : Capteur modulaire du 2m² [25].

Avec :

1. Vitre, glace épaisseur 6mm.
2. Plan absorbant.
3. Panneau isolant polyuréthane.
4. Tôle de protection.
5. Profils pour patton de fixation à serrage automatique.

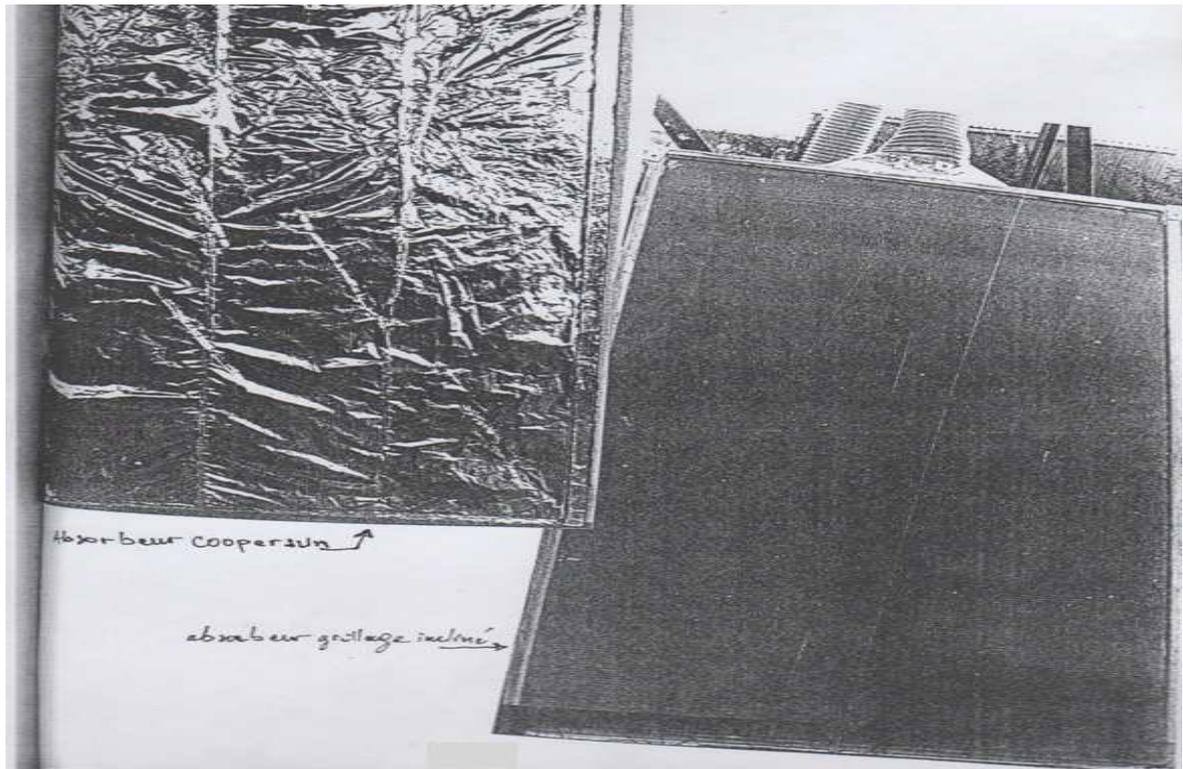


Figure III.37 : Schéma d'un absorbeur utilisé par (B.H [25]).

A) Capteur Type N°01 :

C'est un capteur à deux veines d'air mobiles, de faible inertie thermique, son absorbeur est constitué d'ailettes (grilles, superposées), découpées dans une tôle déployée, traversé de sa face avant vers l'arrière par un débit qu'on fait varier.

Il a circulation mixte, c'est-à-dire à deux lames d'air mobiles. L'air passe par un ensemble de trous et ellipses juxtaposés puis traverse un grillage constituant l'absorbeur avant d'être envoyé dans l'accumulateur. La forme de l'entrée d'air et du grillage contribue à augmenter la turbulence à l'intérieur du capteur, donc à favoriser l'échange thermique.

B) Capteur Type N°02 :

C'est le capteur dont l'absorbeur est en tôle de 1mm d'épaisseur peinte en noir mat et que la circulation du fluide caloporteur se fait à l'intrados de l'absorbeur.

C) Capteur Type N°03 :

Son absorbeur est la feuille de cuivre dendritique de quelques microns d'épaisseur, c'est la seule différence entre les deux autres.

D) Capteur Type N°04 :

Son absorbeur est constitué de la même feuille de cuivre dendritique. En plus il est équipé d'une isolation latérale et arrière de 5cm d'épaisseur, alors qu'elle est de 3cm pour les autres et uniquement à la face arrière.

Celui-ci diffère des autres ; l'entrée et la sortie de l'air s'effectuera par des orifices circulaires de 9cm de diamètre situés à l'arrière de l'absorbeur.

Les trois derniers capteurs sont équipés aussi de deux veines d'air dont un est immobile.

L'air froid entre par les orifices de formes circulaires et elliptiques juxtaposées, lèche la totalité de la surface de l'absorbeur pour extraire le maximum de calories, ensuite il est collecté dans un boîtier hermétique, bien aménagé d'où il sera acheminé vers l'utilisation direct.

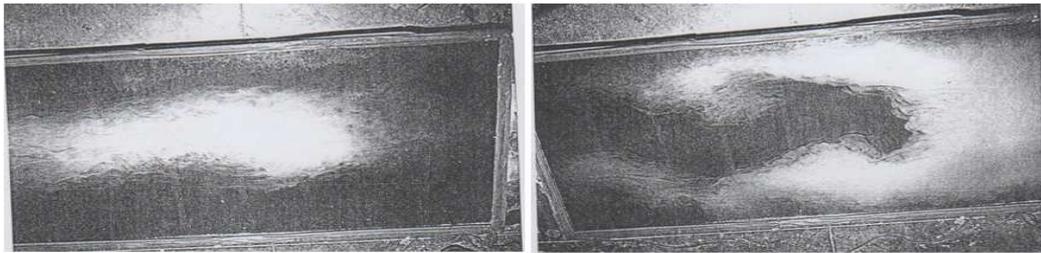


Figure III.38 : Photos représentant, l'écoulement à l'intérieur d'un capteur à air sans chicanes [25].

Les résultats expérimentaux trouvés par Bourhaleb .H [25] sont résumés dans le tableau suivant:

Tableau III.4 : « Les résultats expérimentaux du « Bourhaleb.H » (1987) [25] ».

| Le capteur N1 : | | | | | | | Le capteur N2 : | | | | | | |
|-----------------|-------|--------|-----|-------|-------|------------|-----------------|-------|--------|-----|-------|-------|------------|
| q_v | V | η | Q | T_e | T_s | ΔT | q_v | V | η | Q | T_e | T_s | ΔT |
| 60 | 0.1 | 76 | 650 | 282 | 321.5 | 30.5 | 40 | 0.069 | 50 | 650 | 282 | 320.5 | 29.5 |
| Le capteur N3 : | | | | | | | Le capteur N4 : | | | | | | |
| q_v | V | η | Q | T_e | T_s | ΔT | q_v | V | η | Q | T_e | T_s | ΔT |
| 40 | 0.069 | 50 | 650 | 282 | 322 | 31 | 15 | 0.026 | 36 | 650 | 282 | 335 | 44 |

Avec :

T_e : Température d'entrée en [K].

T_s : Température de sortie en [K].

Q : Le flux de chaleur en [w/m^2].

q_v : Le débit volumique de l'écoulement en [m³/h].

η : Le rendement du capteur en [%].

La surface : $S = S(\text{du verre}) \cdot h(\text{hauteur}) = (2) \cdot (0.08)$

$$S = 0.16\text{m}^2$$

Donc : la vitesse d'entrée : $V = q_v/S$

Pour une situation donnée, telle que : beau temps, ciel dégagé, vitesse du vent faible, l'ensoleillement varie de 570 à 450W/m².

T_{ext} : varie de 7 à 9°C.

Deuxième expérience [25]:

Dans la deuxième expérience Bourhaleb.H change la couverture transparente (verre) en polycarbonate double paroi de 6mm d'épaisseur séparée par une lame d'air statique, qui diminue les pertes avant.

L'expérience se fait en beau temps, froid, humidité relative importante, température extérieure varie de 4 à 6°C.

Flux solaire varie de 440 à 560W/m².

Les résultats expérimentaux trouvés par « Bourhaleb.H » [25] sont représentés dans le tableau suivant :

Tableau III.5 : « les résultats du 2ème expérience de Bourhaleb.H [25].».

| Le capteur N1 : | | | | | | | Le capteur N2: | | | | | | |
|-----------------|-------|--------|-----|-------|-------|------------|----------------|-------|--------|-----|-------|-------|------------|
| q_v | V | η | Q | T_e | T_s | ΔT | q_v | V | η | Q | T_e | T_s | ΔT |
| 54 | 0.093 | 77 | 440 | 279 | 309 | 30 | 40 | 0.069 | 58 | 440 | 279 | 309 | 30 |
| Le capteur N3: | | | | | | | Le capteur N4: | | | | | | |
| q_v | V | η | Q | T_e | T_s | ΔT | q_v | V | η | Q | T_e | T_s | ΔT |
| 12 | 0.021 | 38 | 440 | 279 | 309 | 30 | 20 | 0.035 | 50 | 440 | 279 | 309 | 30 |

Pour une situation donnée, telle que : Beau temps, quelque nuage blanc, vitesse du vent faible, l'ensoleillement varie de 440 à 560W/m².

T_{ext} : varie de 4 à 5°C.

III.5.2.1.2 Capteurs avec chicanes [25]:

Pour améliorer le rendement de capteur Bourhaleb.H utilise des obstacles appelés « chicanes », ces dernières sont placées d'une manière judicieuse dans la veine d'air mobile.

➤ **Les avantages des chicanes :**

- Diminuer au maximum les zones mortes.
- Renvoyer le fluide caloporteur vers l'absorbeur pour extraire le plus possible de calories, et le garder en contact permanent avec l'absorbeur.
- Augmenter la trajectoire du fluide, donc, un gain en température important.
- Provoquer une grande agitation du fluide à l'intérieur du capteur.

➤ **L'inconvénient :**

Augmente légèrement les pertes de charge.

Remarque : le choix de la forme et des dimensions des chicanes est fait par une visualisation de l'écoulement dans un capteur transparent fabriqué au laboratoire.

Dans ce sens, Bourhaleb.H [25] a étudié deux types de chicanes triangulaire et rectangulaire :

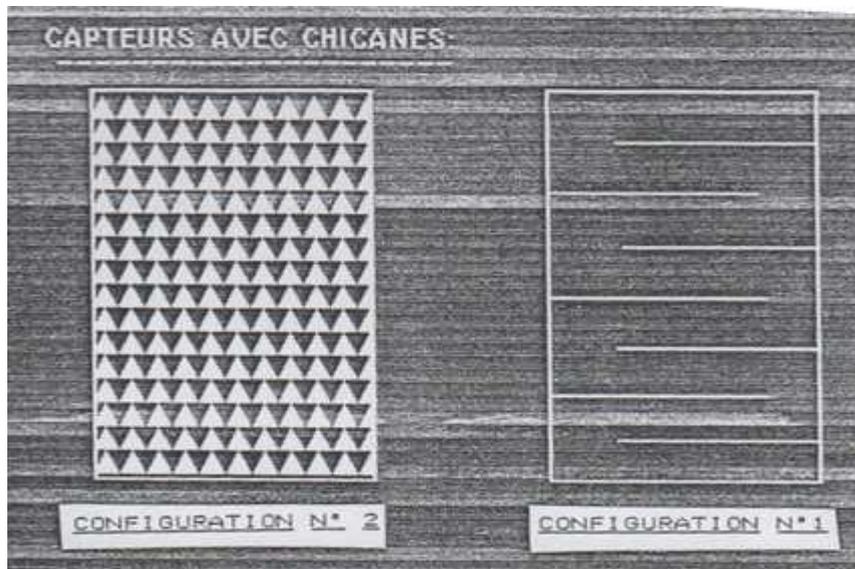


Figure III.39: Les deux configurations de chicanes utilisées [25].

A) Configuration N°01 (chicanes rectangulaires):

Les chicanes sont placées perpendiculairement à l'écoulement pour lui permettre de lécher toute la surface et d'augmenter la turbulence, et un brassage du fluide à l'intérieur du capteur ; c'est l'une des raisons qui permettent d'améliorer le rendement des capteurs.

Tableau III.6 : « les résultats obtenus par Bourhaleb.H dans le cas des capteurs avec chicanes rectangulaires ».

| Le capteur N1 : | | | | | | | Le capteur N2 : | | | | | | |
|-----------------|-------|--------|-----|-------|-------|------------|-----------------|-------|--------|-----|-------|-------|------------|
| q_v | V | η | Q | T_e | T_s | ΔT | q_v | V | η | Q | T_e | T_s | ΔT |
| 54 | 0.093 | 77 | 440 | 279 | 309 | 30 | 20 | 0.035 | 34 | 440 | 279 | 309 | 30 |
| Le capteur N3 : | | | | | | | Le capteur N4 : | | | | | | |
| q_v | V | η | Q | T_e | T_s | ΔT | q_v | V | η | Q | T_e | T_s | ΔT |
| 10 | 0.017 | 30 | 440 | 279 | 309 | 30 | 30 | 0.052 | 60 | 440 | 279 | 309 | 30 |

B) Configuration N°02 (chicanes triangulaires):

Dans le laboratoire l'équipe travaillant sur les écoulements sur des plaques formées en aile delta a montré que, un certains nombres d'angles favorisent l'organisation du tourbillon à faible incidence.

Pour les capteurs à air, Bourhaleb.H a expérimente une aile delta de 50°, celui-ci ne fait pas partie de cette famille.

- Pour une incidence de 20°, on obtient les deux tourbillons qui s'éclatent vers la fin de l'aile.

- A 25° l'éclatement du tourbillon est avancé plus vers la pointe de l'aile.

- Pour une incidence de 45°, l'éclatement du tourbillon se produit à la pointe de l'aile. On constate une formation d'un nuage de fumée situé derrière l'aile delta.

- Par contre, pour une incidence de 90° (perpendiculaire à l'écoulement), l'agitation du fumée est beaucoup plus importante, celle-ci dirigée vers l'absorbeur léchant une grande partie de sa surface, ce qui explique le meilleur rendement obtenu en comparaison avec les cas précédents.

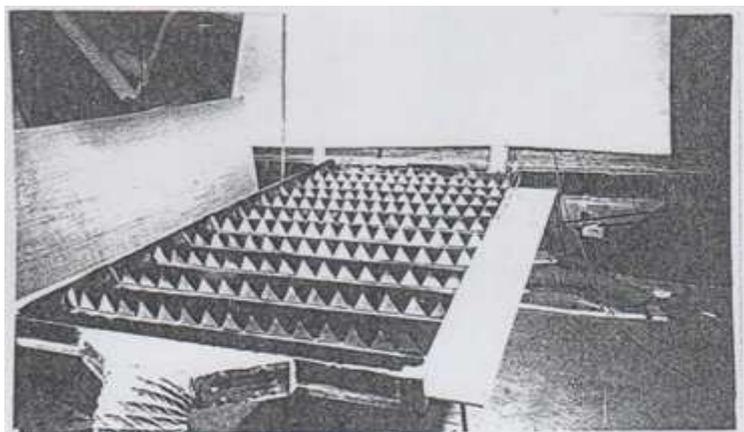


Figure III.40: Chicanes en forme triangulaire placées à l'intérieur d'un capteur [25].

Les rendements obtenus des capteurs avec chicanes en forme triangulaire sont :

- Le meilleur rendement obtenu est celui, dont les chicanes sont en contact permanent avec l'absorbeur puisque la hauteur de la chicane est de 32cm et celle de la veine d'air est de 34cm.

- Le rendement obtenu est inférieur au précédent pour une incidence de 45°, car la hauteur de la chicane est de 22.63cm laisse un espace important entre la pointe de la chicane et l'absorbeur. Ce rendement est obtenu aussi avec un capteur sans chicanes.

- A l'incidence de 30°, le rendement baisse encore plus, car l'écart entre l'absorbeur et la chicane augmente encore, aussi cette incidence organise l'écoulement du fluide.

- A l'incidence de 20°, donne le rendement le plus faible, car cette configuration organise le mieux l'écoulement.

Conclusion :

D'après les résultats de l'expérimentation des différents capteurs avec ou sans obstacles, traduits par les courbes de la recherche bibliographique, on obtient une classification selon leur performance.

Les capteurs sans obstacles donnent des débits supérieurs par rapport aux débits d'utilisations pour les capteurs dont les chicanes sont des triangles fixés sur l'isolant et surtout à faibles incidences.

Ces obstacles contribuent à une rotation organisée du fluide caloporteur qui se dirige coté isolant, pour augmenter l'échange thermique dans le capteur solaire.

Le capteur dont l'absorbeur est la tôle déployée présente un rendement supérieur à configurations précédentes grâce à ses deux veines d'air mobiles qui lui permettent un échange thermique entre le fluide et les deux faces de l'absorbeur.



Chapitre IV
Résultats et Discussions

Introduction :

En premier lieu la validation des résultats, dans l'introduction, il faut montrer la stratégie de la simulation, l'étude de la chaîne énergétique et principalement réservé à l'étude de la production de l'énergie au niveau du capteur, et au stockage de cette énergie. En commençant par l'étude du stockage du type « Mur Trombe » en reportant les mêmes propriétés thermo physiques des matériaux constituant ce mur Trombe utilisés par Catalin Grigoras et al [50].

Deux conditions aux limites particulières sont étudiées :

* Le cas où le mur est bien isolé c'est le cas d'un mur Trombe adiabatique ;

* Le cas où le mur est sans isolation, dans ce cas un flux constant et imposé au mur.

Dans un deuxième lieu, on étudie la simulation de l'écoulement d'où au sein des capteurs solaires pour ce faire on procède à deux séries d'expérience numérique :

1. Capteur solaire sans chicane, les travaux de la simulation sont classés en deux catégories ;

1.1 Couverture transparente en polycarbonate simple vitrage.

1.2 Couverture transparente en polycarbonate double vitrage.

2. Capteur solaire avec chicanes;

2.1 Capteur solaire avec chicanes rectangulaires.

2.2 Capteur solaire avec chicanes triangulaires.

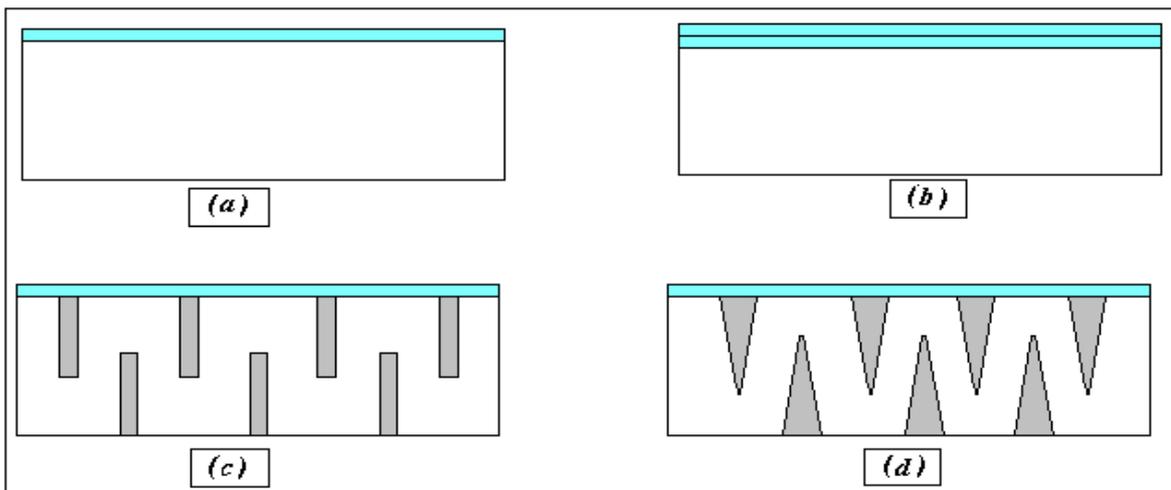


Figure IV.1 : Schéma représentant les quatre types des capteurs solaires plans étudiés. a) Capteur solaire avec couverture de simple vitrage ; b) Capteur solaire avec couverture double vitrage ; c) Capteur solaire avec chicanes rectangulaires ; d) Capteur solaire avec chicanes triangulaires.

IV.1 Etude de stockage type « mur Trombe » :

IV.1.1 Description de la géométrie :

L'ensemble de la paroi comporte une lame d'air intercalée entre les matériaux de structure. Cette lame d'air forme un circuit aérien distinct, avec une entrée d'air froid venant de bas et l'autre pour la sortie d'air chaud venant de haut et les deux sont de l'intérieur de la pièce.

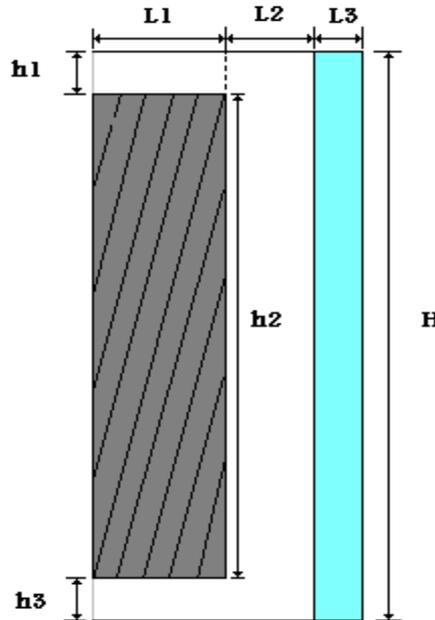


Figure IV.2: La géométrie étudiée [50].

- a) le mur porteur (béton chanvre): $L1=16$ cm;
- b) le canal d'air chaud, film de circuit et permettant de préchauffer l'air de renouvellement: $L2=10$ cm;
- c) l'entrée de l'air froid: $h3=6$ cm;
- e) la sortie de l'air chaud: $h1=6$ cm;
- f) la vitre: $L3=6$ cm.
- g) la hauteur du mur : $h2=1$ m ;
- h) la hauteur du vitre : $H=1.12$ m.

Le mur Trombe comporte des ouvertures qui permettent un échange entre l'air de la pièce et l'air contenu entre le vitrage et le mur. Mais lorsque l'ensoleillement n'est pas suffisant, il se produit l'effet inverse, et l'air se refroidit. Pour éviter ce phénomène, on place des clapets sur les ouvertures que l'on renferme lorsqu'il n'y a pas de soleil. Le chauffage est réalisé donc par deux manières différentes; par convection, grâce à la circulation de l'air, et par rayonnement, grâce au déphasage du mur.

Tableau IV.1 : « Les propriétés thermo-physiques des matériaux qui composent la paroi [5]».

| matériaux | Epaisseur (m) | Conductivité thermique W/m.K | Masse volumique Kg/m ³ | Chaleur massique J/kg.K |
|----------------------|---------------|------------------------------|-----------------------------------|-------------------------|
| <i>Béton chanvre</i> | 0.16 | 0.045 | 300 | 1300 |
| <i>L'air</i> | 0.10 | 0.024 | 1.225 | 1006.43 |
| <i>Vitre</i> | 0.06 | 1.3 | 2500 | 1500 |

➤ **Calcul de la paroi :**

a) Calcul de la résistance et de la conductance thermique :

Le calcul est réalisé en utilisant la relation :

$$R = \frac{1}{h_{int}} + \sum_{i=1}^n \frac{\delta_i}{\lambda_i} + \frac{1}{h_{ext}} \quad [m^2 \cdot K/W] \quad (IV.1)$$

Avec :

$$h_{int}=8 \text{ W/m}^2\text{K} \quad \text{et} \quad h_{ext}=24 \text{ W/m}^2\text{K}$$

b) Calcul du flux de chaleur en régime permanent:

$$Q = \frac{T_i - T_e}{R} \cdot S \quad (IV.2)$$

On prend $S=2m^2$

$$R = R_i + R_M + R_{LA} + R_V + R_e$$

Tel que :

R_i : Résistance thermique de la pièce intérieure.

R_M : Résistance thermique du mur en béton.

R_{LA} : Résistance thermique de la lame d'air.

R_V : Résistance thermique de la vitre.

R_e : Résistance thermique de l'extérieure.

$R = 7.92m.K/W$ et $Q = 5.49W/m^2$.

IV.1.2 Influence de maillage :

Une série d'essais pour des maillages non uniformes a été effectuée, trois grilles ont été examinées: 3584 nœuds, 14336 nœuds et 67200 nœuds. Les résultats obtenus sont tracés pour le profil de vitesse et le profil de température (figures IV.3 et IV.4). Le choix de la distribution du maillage s'avère suffisant pour la chaîne des essais du maillage étudiés (3584 nœuds).

IV.1.2.1 Profil de vitesse :

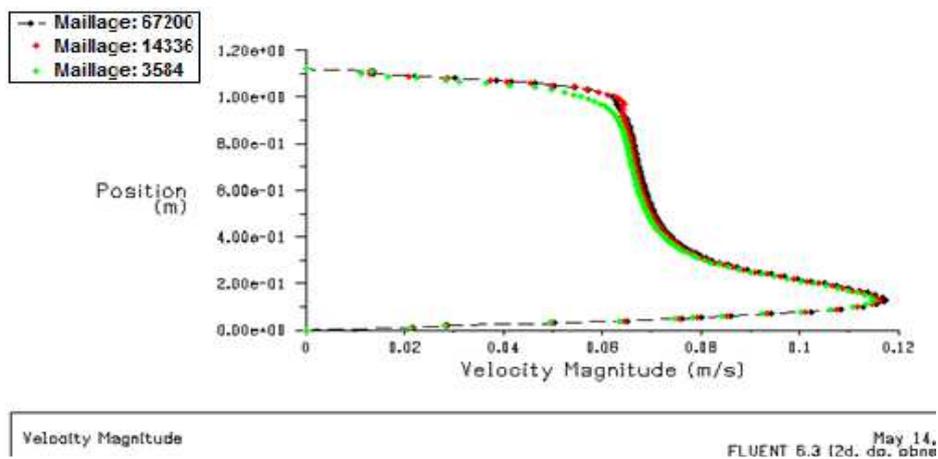


Figure IV.3 : Influence de maillage sur le profil de vitesse.

IV.1.2.2 Profil de Température :

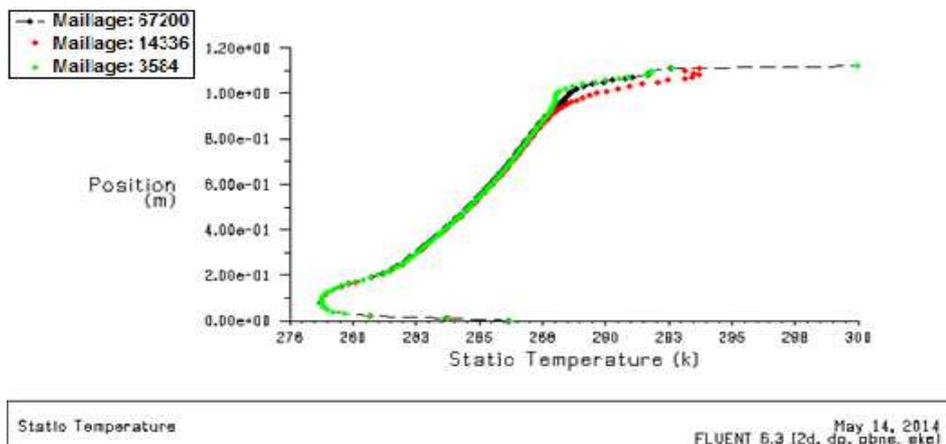


Figure IV.4 : Influence de maillage sur le profil de température.

IV.1.3 Validation des résultats :

Les résultats de la simulation numérique ont été validés avec les travaux de CATALIN GRIGORAS et al [50]. Ces résultats sont donnés par la figure IV.5. La figure montre une bonne concordance entre nos résultats et les résultats de CATALIN.

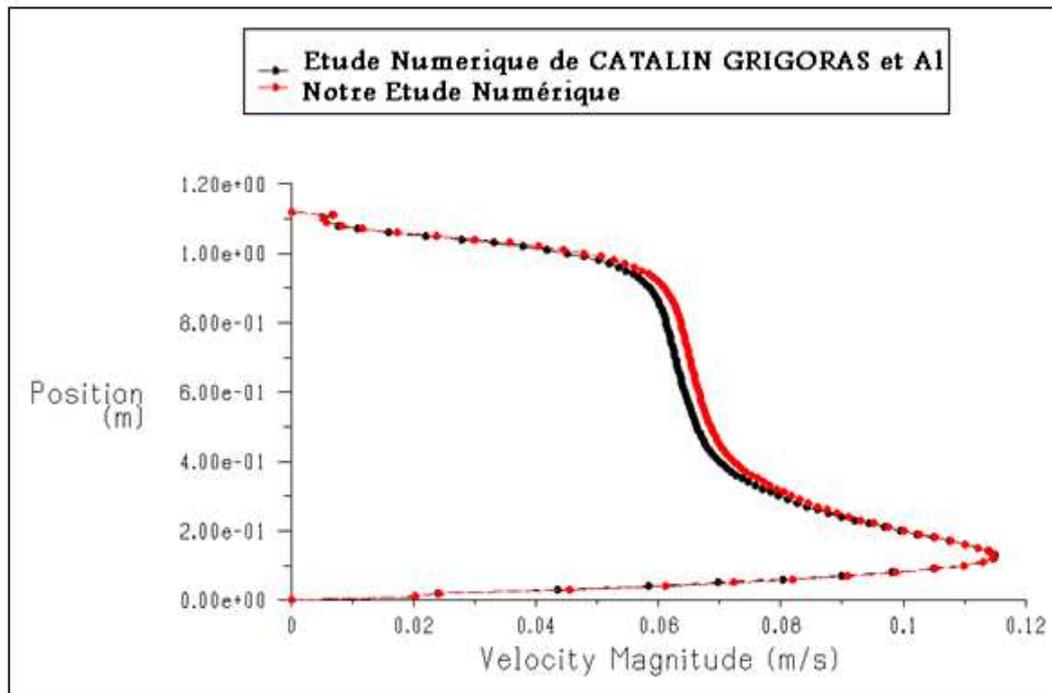


Figure IV.5 : comparaison des résultats.

IV.1.4 Discussion :

Les travaux de simulation sont classés en deux catégories :

- Le mur Trombe avec une circulation de l'air vers l'intérieur de la pièce, on a introduit les conditions aux limites précédentes.
- Le mur Trombe avec une circulation de l'air vers l'intérieur de la pièce pour le rafraîchissement pendant la nuit dans la saison chaude. Les conditions suivantes sont introduites: $T_i=303K$ et un flux de chaleur sur le vitrage : $\phi=0W/m^2$.

IV.1.4.1 Mur Trombe adiabatique :

IV.1.4.1.1 Les conditions aux limites :

- La température de l'intérieur : $T_i = 278K$.
- La température de l'extérieur avec un rayonnement solaire : $T_e=303K$.

Entrée $T_e=278 K$ **Haut** $T=300 K$
 $V_e=0.1 m/s$

Sortie $T_s=295 K$ **Bas** $Q = 0W/m^2$.
 $P_s=1 atm$

IV.1.4.1.2 Champ de vitesse :

La figure (IV.6) montre le champ de la vitesse longitudinale le long du mur.

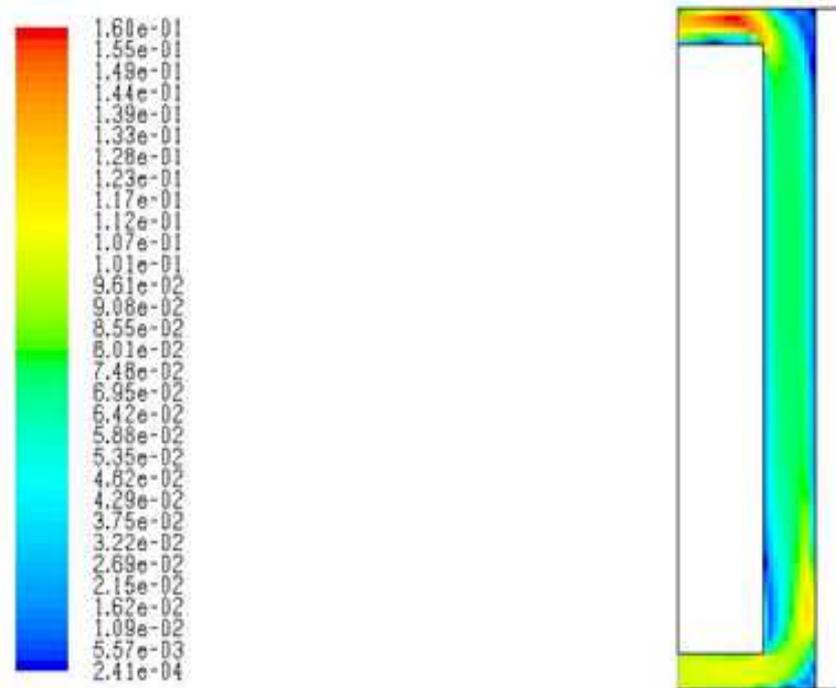


Figure IV.6 : Contours de vitesse.

D'après ce résultat numérique au-dessus, on remarque clairement que les valeurs de vitesse sont très faibles au voisinage de vitre et le mur (en béton), surtout dans les volumes morts et dans les régions situées au milieu d'écoulement d'air, et puis augmente à la sortie du film de circuit ($v=0.155\text{m/s}$), en raison de rayonnement du vitre. Approchant ainsi des valeurs de l'ordre de 155% de la vitesse d'entrée.

IV.1.4.1.3 Profils de vitesse :

Les profils de vitesse sont prises pour plusieurs sections de la veine fluide.

- 1- au milieu du film de circuit ($X=0.24\text{m}$).
- 2- à l'entrée d'air froid ($y=0.03\text{m}$).
- 3- à la sortie d'air chaud ($y=1.09\text{m}$).

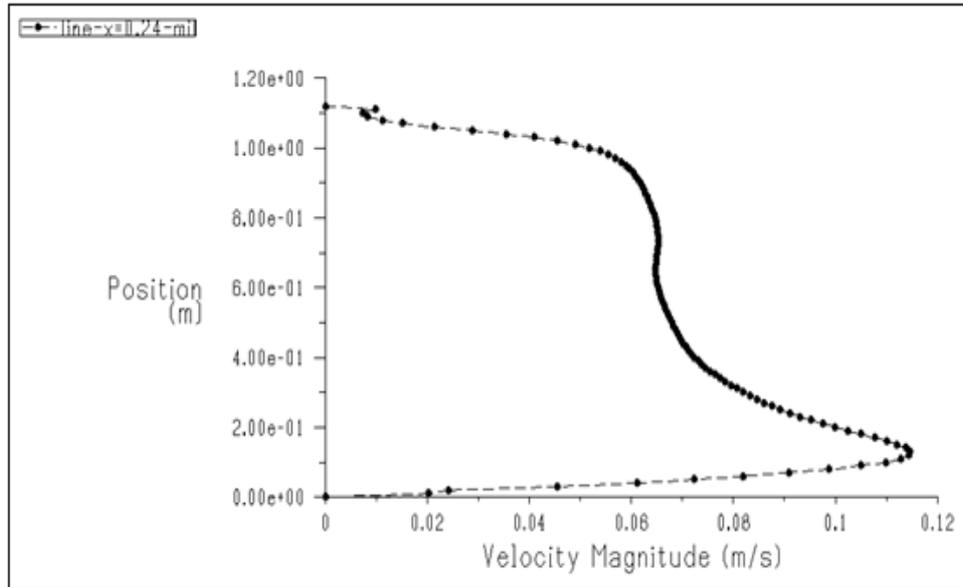


Figure IV.7 : Profil de vitesse $x=0.24\text{m}$.

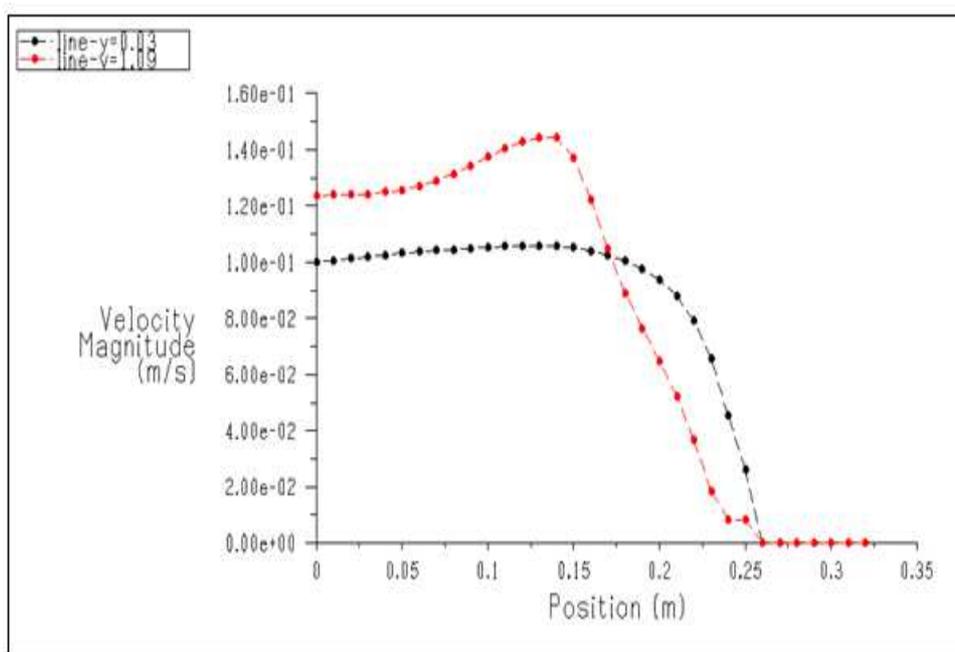


Figure IV.8 : Profil de vitesse $y=0.03\text{m}$ et $y=1.09\text{m}$.

Les figures IV.7 et IV.8 présentent les profils de la température totale au milieu intérieur entre le vitre et le mur, et à l'entrée d'air froid et à la sortie d'air chaud progressivement.

On remarque que la vitesse diminuée au milieu du film de circuit où le réchauffement est plus important à cause du rayonnement.

IV.1.4.1.4 Champs de température :

Les profils de températures sont donnés par la figure (IV.9).

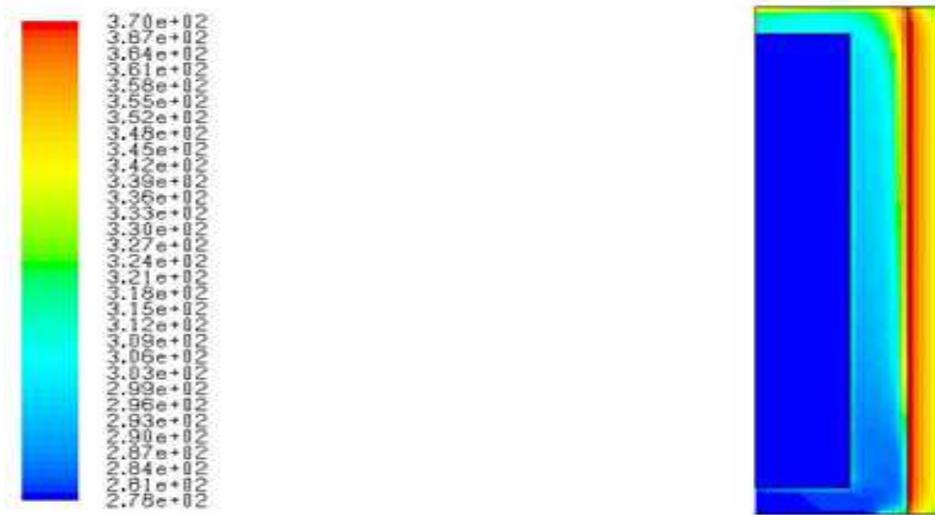


Figure IV.9 : Contours de Température.

On observe que pour la section du film de circuit d'air froid, la température augmente au voisinage de la vitre jusqu'à la sortie du canal où, elle prend la valeur maximale ($T=343K$), se qui donne un très bon transfert thermique entre la vitre et l'air froid.

IV.1.4.1.5 Profils température :

La variation de la température totale pour le mur apparaît clairement sur les contours et sur leurs échelles. Pour bien étudier cette évolution, on a tracé des courbes de température pour les sections $x=0.24m$, $y=0.03m$ et $y=1.09m$.

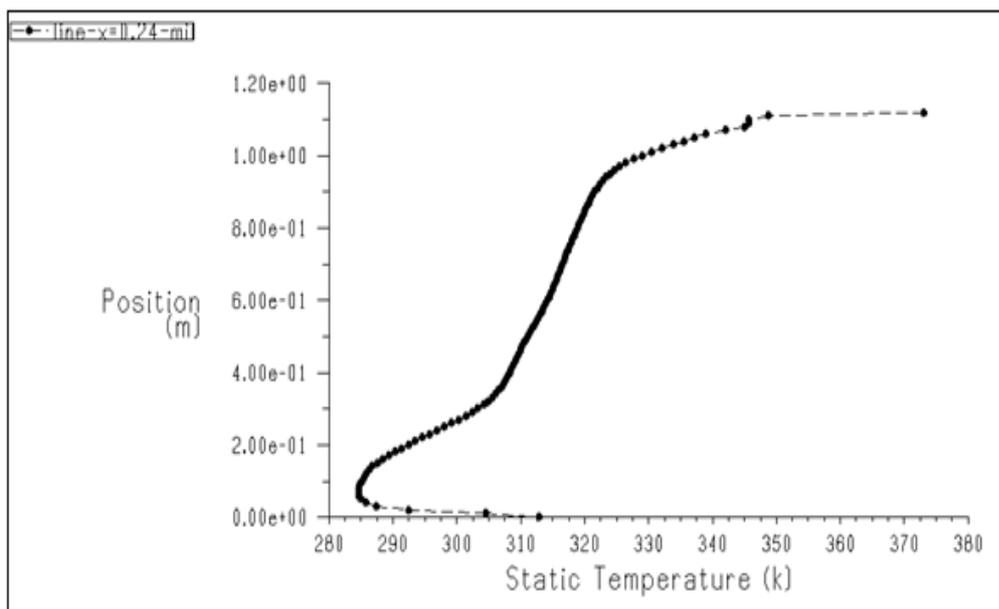


Figure IV.10: Profil de Température $x=0.24m$.

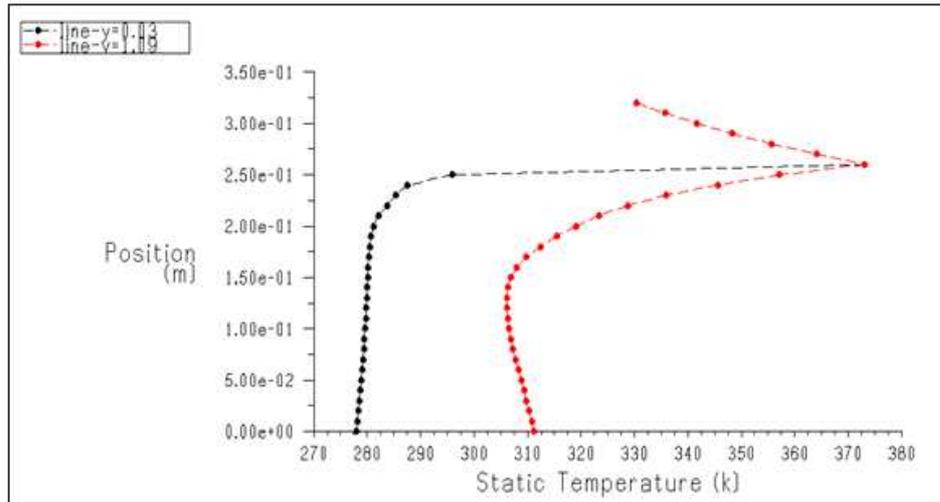


Figure IV.11: Profil de Température $y=0.03m$ et $y=1.09m$.

Les figures (IV.10 et IV.11) présente les profils de la température totale en $x=0.24m$, $y=0.03m$ et $y=1.09m$.

On observe que les sections les plus proches de vitre sont les mieux chauffées que les sections éloignées.

IV.1.3.2 Mur Trombe avec flux constant:

IV.1.3.2.1 Les conditions aux limites :

- La température de l'intérieur : $T_i = 278K$.
- La température de l'extérieur avec un rayonnement solaire : $T_e=303K$.

Entrée $T_e=278 K$ **Haut** $Q = 650W/m^2$.

$V_e=0.1 m/s$

Sortie $T_s=295 K$ **Bas** $T=300 K$

$P_s=1 atm$

IV.1.4.2.2 Champ de vitesse :

La figure (IV.12) montre du profil de la vitesse.



Figure IV.12: Contours de vitesse.

La figure IV.12 montre l'ampleur du contour du champ de vitesse dans le mur.

Les résultats Numériques montrent des valeurs très faibles de la vitesse au voisinage de la vitre, le mur et les volumes morts.

Dans les régions d'écoulement d'air et à la sortie, la vitesse augmente.

On remarque que les valeurs de vitesse sont importantes par rapport au 1^{ère} cas adiabatique ($v=0.16\text{m/s}$) approchant ainsi des valeurs de l'ordre de 160% de la vitesse d'entrée.

IV.1.4.2.3 Profils de vitesse :

Les profils de vitesse sont pris dans les sections : ($x=0.24\text{m}$, $y=0.03\text{m}$ et $y=1.09\text{m}$) de la veine fluide.

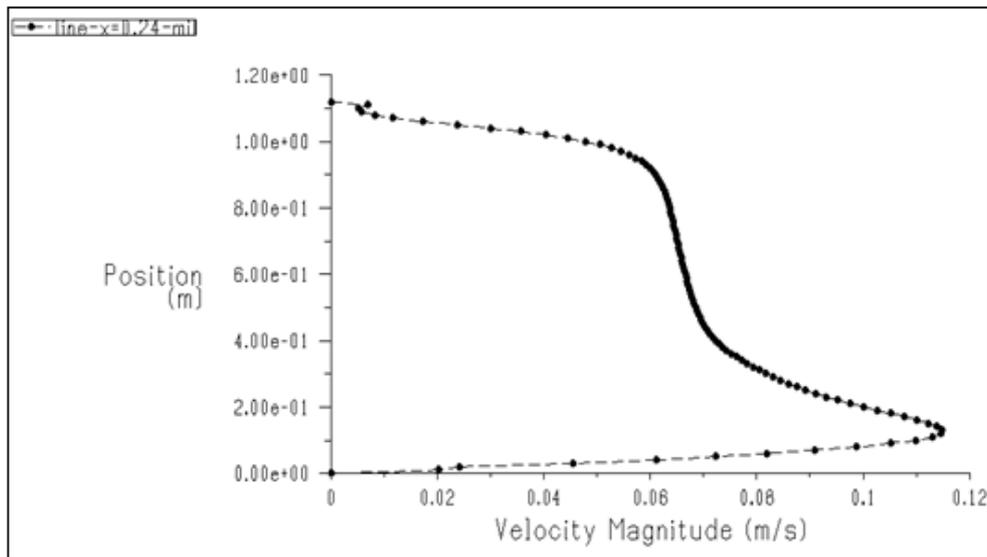


Figure IV.13: Profil de Vitesse $x=0.24\text{m}$.

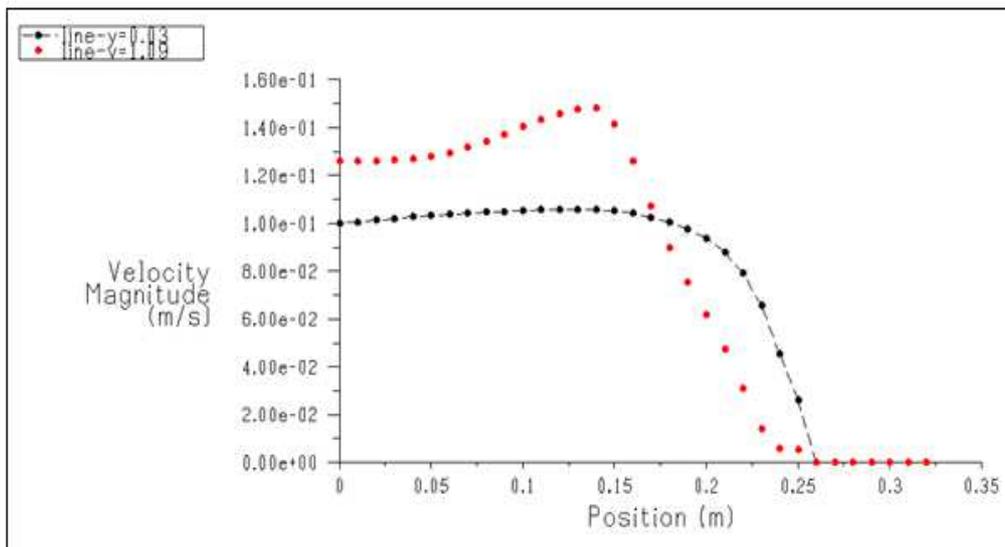


Figure IV.14: Profil de Vitesse $y=0.03\text{m}$ et $y=1.09\text{m}$.

On constate pour le cas $x=0.24m$, $y=0.03m$ et $y=1.09m$ que les valeurs de la vitesse axiale sont réduites par rapport à la vitesse d'entrée et augmente près de la sortie du film de circuit d'air.

IV.1.4.2.4 Champs de température :

Les champs de températures sont donnés par la figure (IV.15).



Figure IV.15 : Contours de Température.

La Figure IV.15, montre que la température de l'air dans les zones de vitre, le film de circulation d'air et à la sortie est sensiblement élevée.

Une baisse de température dans les zones situées à l'entrée est observée.

IV.1.4.2.5 Profils de température :

Les profils de température sont pris dans les sections $x=0.24m$, $y=0.03m$ et $y=1.09m$ de la veine fluide.

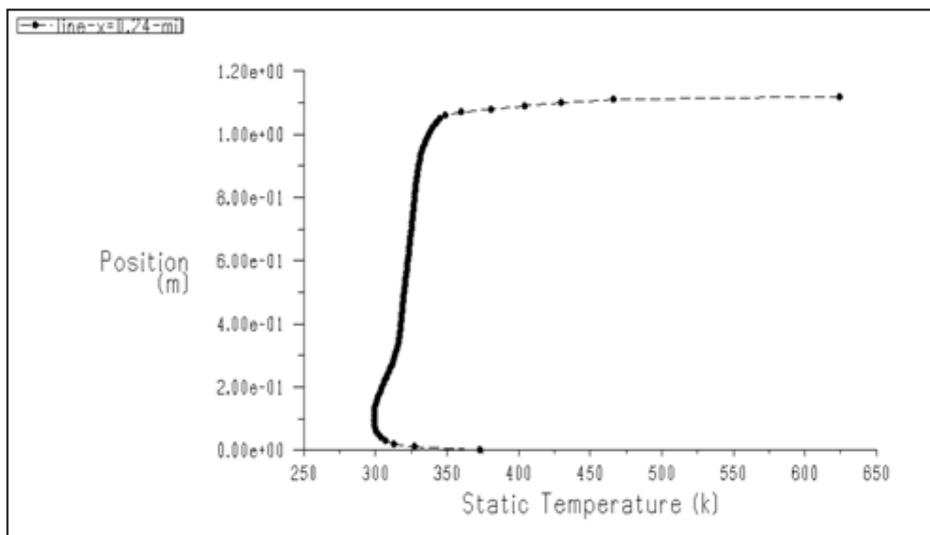


Figure IV.16: Profil de Température $x=0.24m$.

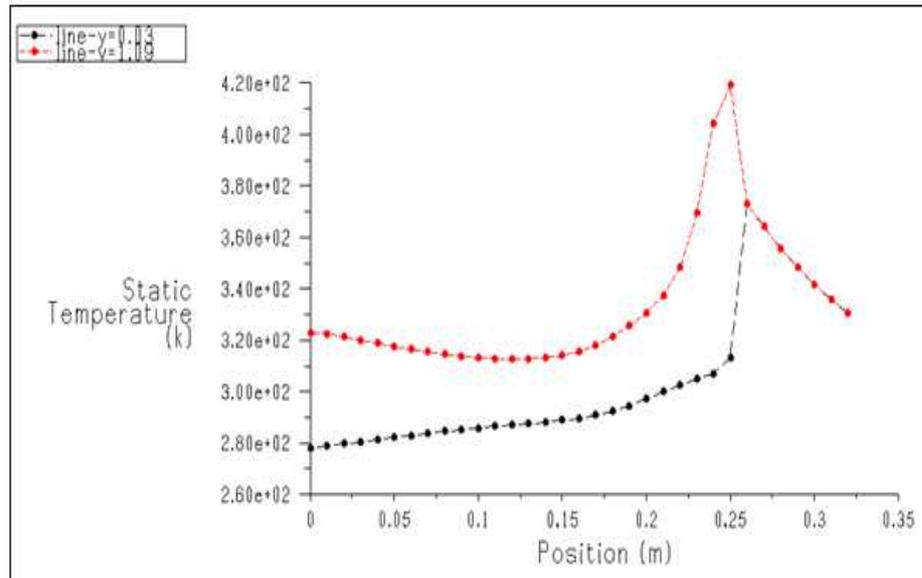


Figure IV.17: Profil de Température $y=0.03m$ et $y=1.09$.

D'après les résultats numériques ci-dessus, on remarque clairement que les valeurs de température sont très faibles au milieu d'écoulement d'air, en raison de l'effet de serre.

D'après l'analyse des allures des graphes de la température totale et ceux de la vitesse axiale, on peut dire qu'il y a une proportionnalité inverse entre la vitesse axiale de l'air et sa température dans chaque section transversale.

IV.2 Etude de l'écoulement dans le capteur:

IV.2.1 Etude de l'écoulement dans le capteur sans chicane :

L'étude numérique se fait sur les mêmes modèles de capteurs étudiés expérimentalement par « Bourhaleb.H » [25], le but est de comparer leur rendement dans les mêmes conditions, afin de déterminer le capteur le plus performant numériquement.

IV.2.1.1 Description de la géométrie :

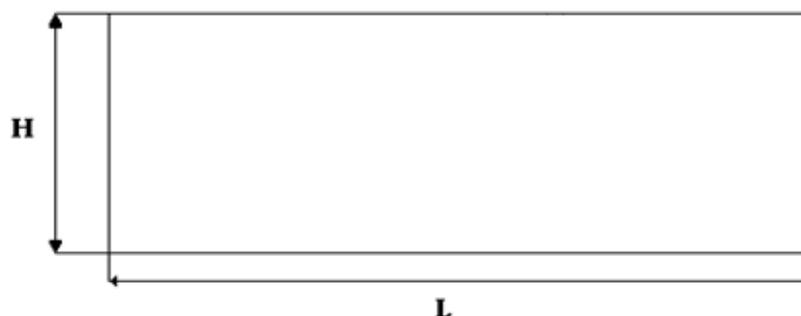


Figure IV.18: La géométrie étudiée.

Les dimensions du canal présentées dans ce travail :

- La longueur du capteur : $L= 0.24 \text{ m}$
- La hauteur du capteur : $H=0.08\text{m}$
- La rugosité de la paroi : $\epsilon_p= 0.02\text{m}$.

IV.2.1.2 Influence de maillage :

Nous avons étudié l'influence de raffinement du maillage dans le cas d'un capteur solaire palm a air avec chicane rectangulaire pour les trois grilles suivantes :(120000 nœuds, 76800 nœuds et 19200 nœuds). Le maillage utilisé dans cette étude est (19200 nœuds). Les profils de vitesse (figure IV.19) et de température (figure IV.20) sont tracés pour les trois grilles étudiées. Les deux courbes indiquent que les profils sont indépendants du maillage, et un choix d'une grille 19200 est justifié.

IV.2.1.2.1 Profil de Vitesse :

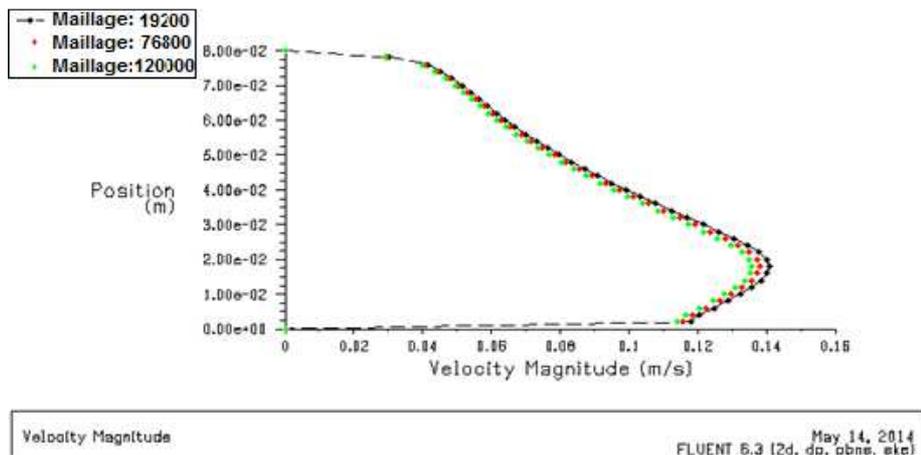


Figure IV.19: L'influence de maillage sur le profil de vitesse.

IV.2.1.2.1 Profil de Température :

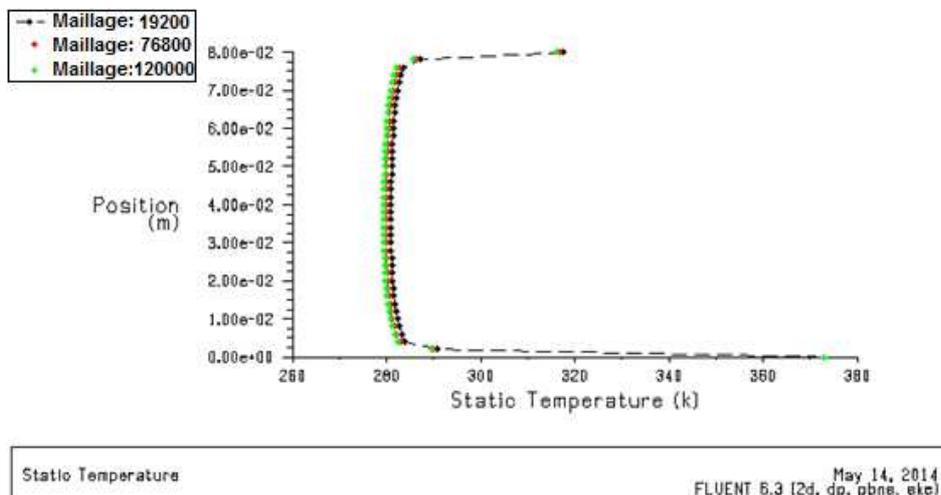


Figure IV.20: L'influence de maillage sur le profil de vitesse.

Une série d'essais pour des maillages a été effectuée : 19200, 76800 et 120000. Les résultats obtenus sont tracés sur les figures : 19 et 20. Ils sont suffisants pour le maillage étudié.

IV.2.1.3 Validation des résultats :

La comparaison entre nos résultats numériques et ceux de « Bourhaleb Houssine ». [25], est présentée sur la figure IV.21, pour une position axiale $x=0,135\text{m}$, les courbes montrent une bonne concordance entre les vitesses axiales.

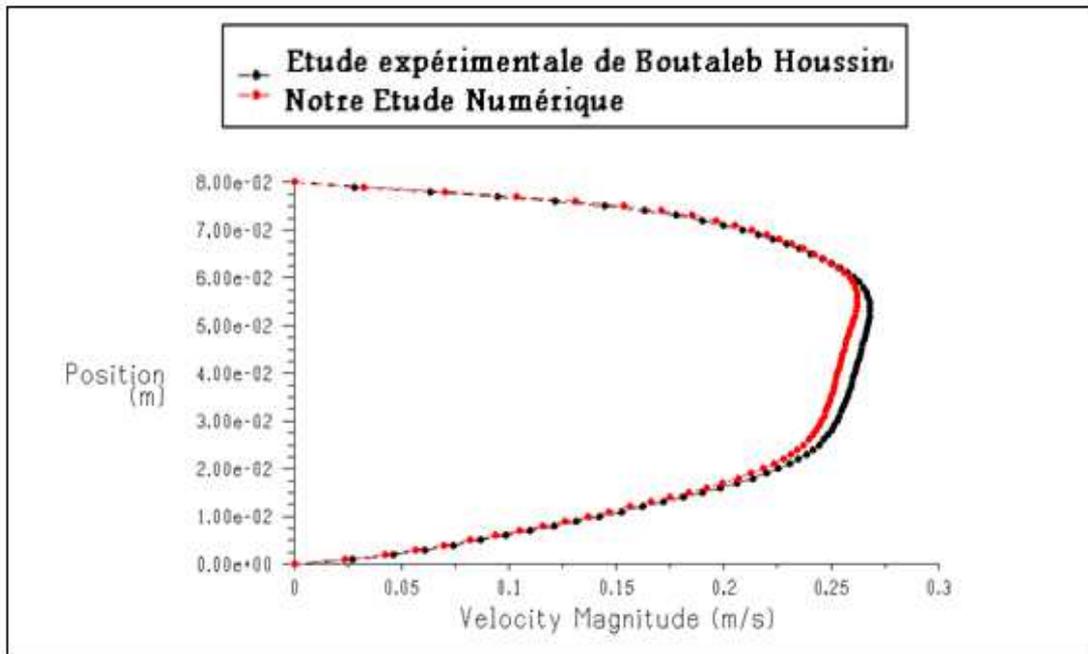


Figure IV.21 : Validation de la simulation numérique avec les résultats expérimentaux de Bourhaleb Houssine. [25]

IV.2.1.4 Discussion :

Les travaux de simulation sont classés en deux catégories :

- La couverture transparente (verre) en polycarbonate une seule paroi de 5 mm d'épaisseur.
- La couverture transparente (verre) en polycarbonate double paroi de 6mm d'épaisseur séparée par une lame d'air statique, qui diminue les pertes vers l'avant.

IV.2.1.4.1 Le 1^{ère} Cas (Un seul vitrage) :

IV.2.1.4.1.1 Les conditions aux limites :

On résume les conditions aux limites dans le tableau suivant :

Tableau IV.2 : « Les conditions aux limites du 1^{er} cas des capteurs sans chicanes ».

| Le capteur N1 : | | | | | | Le capteur N2 : | | | | | |
|-----------------|-------|-------|-------------|---------------|----------------|-----------------|-------|-------|-------------|---------------|-----------------|
| U_e | T_e | T_s | P_s | k | ε | U_e | T_e | T_s | P_s | k | ε |
| 0.1 | 282 | 321 | <i>Patm</i> | 5.10^{-5} | $2.5.10^{-10}$ | 0.069 | 282 | 320.5 | <i>Patm</i> | $2.3.10^{-5}$ | $5.6.10^{-11}$ |
| Le capteur N3 : | | | | | | Le capteur N4 : | | | | | |
| U_e | T_e | T_s | P_s | k | ε | U_e | T_e | T_s | P_s | k | ε |
| 0.069 | 282 | 322 | <i>Patm</i> | $2.3.10^{-5}$ | $5.6.10^{-11}$ | 0.026 | 282 | 335 | <i>Patm</i> | $3.4.10^{-6}$ | $1.14.10^{-12}$ |

- L'énergie cinétique turbulente à l'entrée [93]:

$$k = 0,005 \cdot U_0^2 [m^2/s^2] \tag{IV.1}$$

- L'énergie de dissipation à l'entrée :

$$\varepsilon = 0,1 \cdot k^2 [m^2/s^3] \tag{IV.2}$$

- Le flux de la paroi supérieure :

$$Q = 650W/m^2$$

- La température de l'isolant et des chicanes inférieures :

$$T_{iso} = 373K$$

IV.2.1.4.1.2 Champ de vitesse :

La figure (IV.22) montre le champ de la vitesse longitudinale le long du conduit illustrée par la figure (IV.18).

Le calcul a pu capter plusieurs phénomènes physiques caractérisant cet écoulement, on note entre autres ce qui suit :

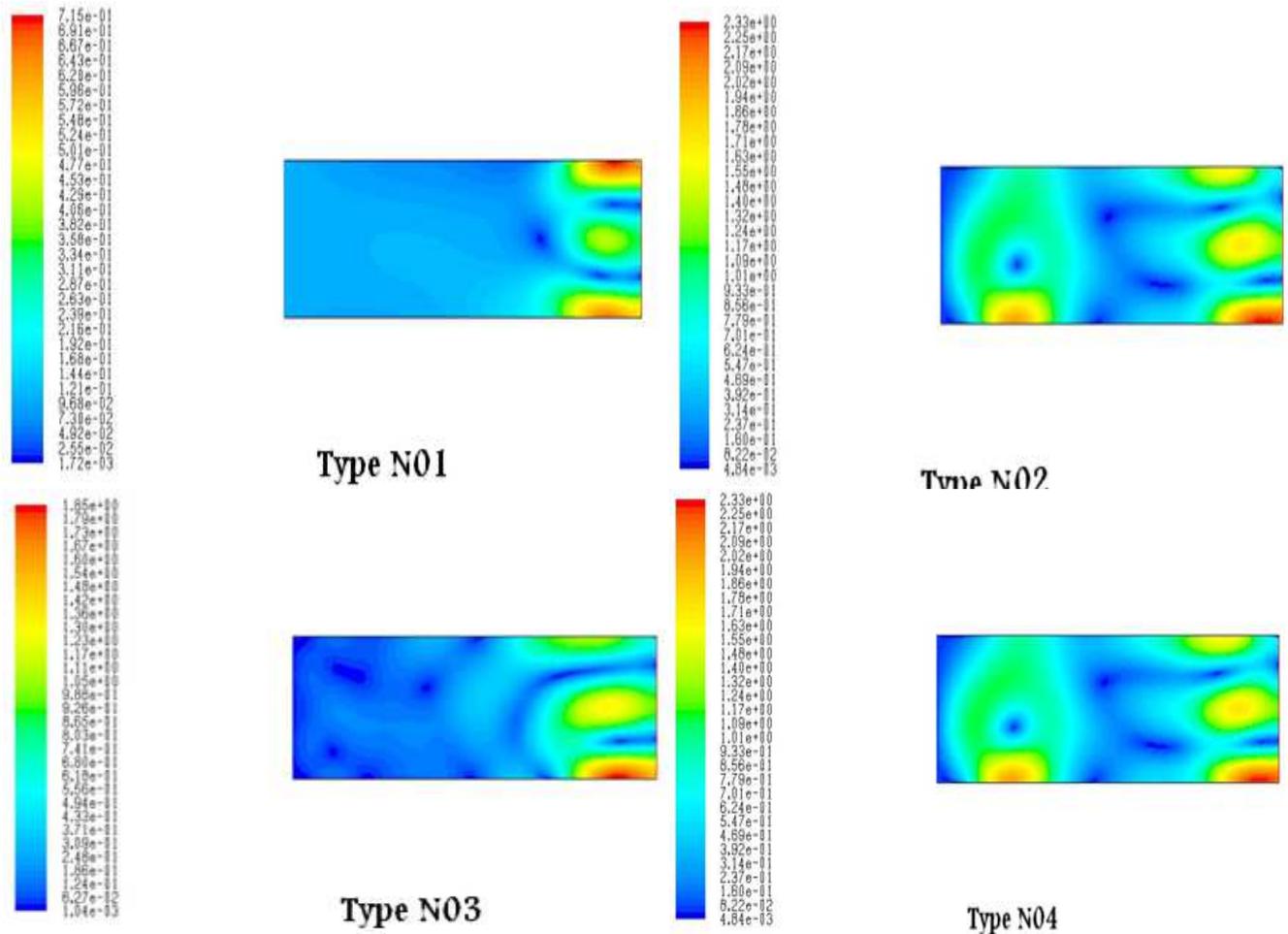


Figure IV.22 : Contours de vitesse pour les quatre types.

La figure IV.22 montre l'ampleur du contour du champ de vitesse dans les quatre types des capteurs étudiés.

Les résultats numériques montrent des valeurs très faibles de la vitesse au voisinage de l'entrée.

Pour les capteurs de type N2, N3, la vitesse augmente de façon importante près de l'entrée et de sortie.

Pour les capteurs de type N1 et N4, les plus hautes valeurs de la vitesse apparaissent près de la sortie.

IV.2.1.4.1.3 Profils de vitesse:

Les profils de vitesse sont pris dans la section en milieu $x=0.12\text{m}$ de la veine fluide.

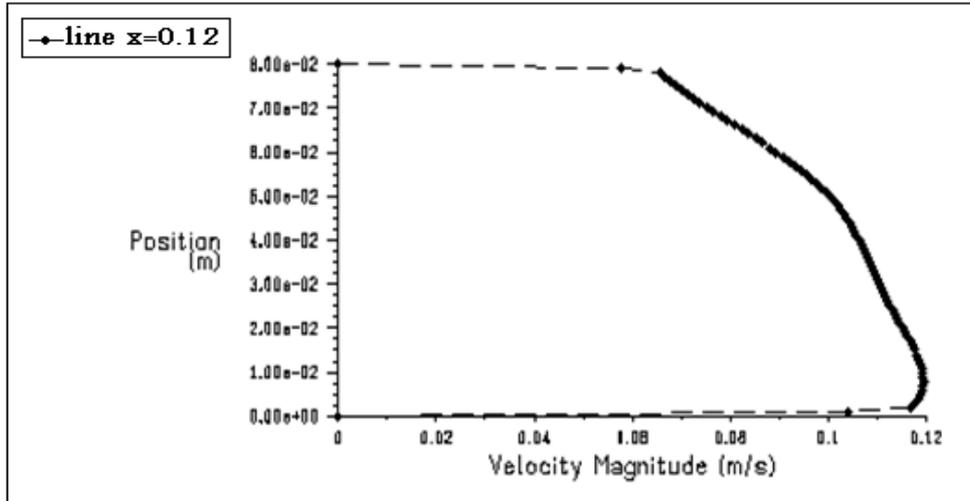


Figure IV.23: Profils de la vitesse Type N01.

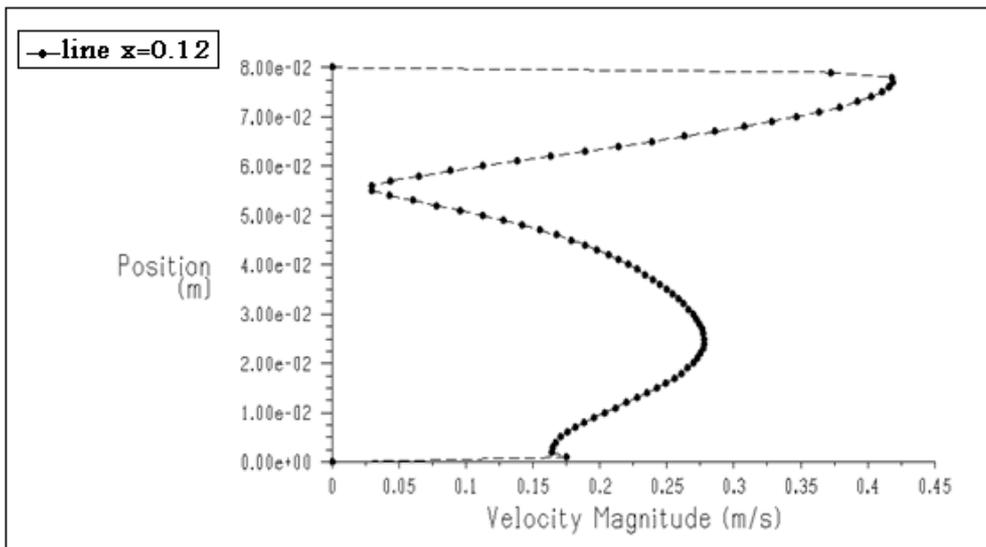


Figure IV.24: Profils de la vitesse Type N02.

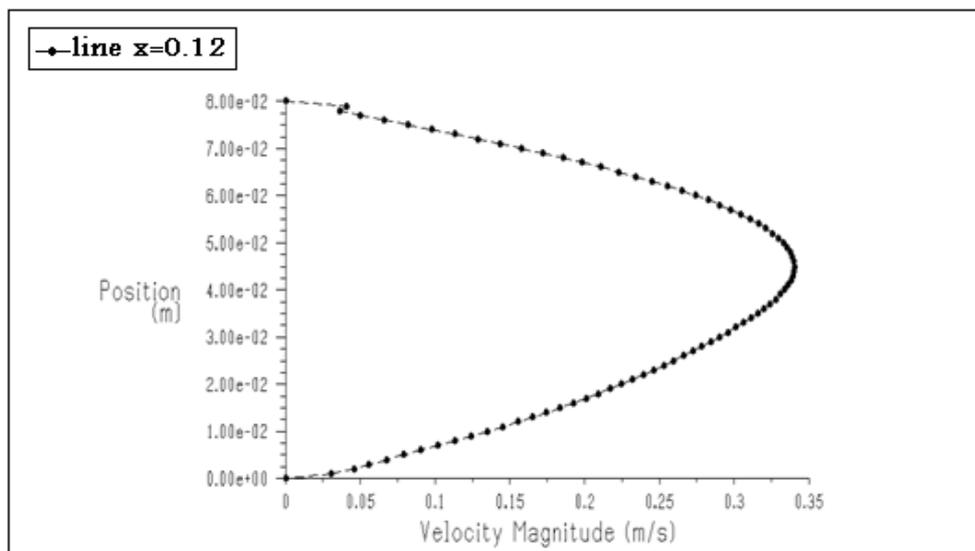


Figure IV.25: Profils de la vitesse Type N03.

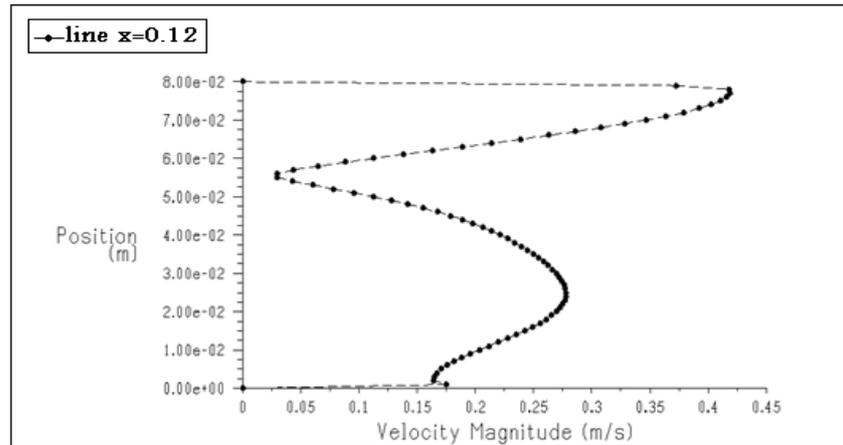


Figure IV.26: Profils de la vitesse Type N04.

On constate pour le cas $x = 0,12\text{m}$ situées au milieu, que les valeurs de la vitesse axiale sont réduites par rapport à la vitesse d'entrée (vitesse de référence).

IV.2.1.4.1.4 Champs de Température :

La figure (IV.27) montre le champ de la température le long du capteur.

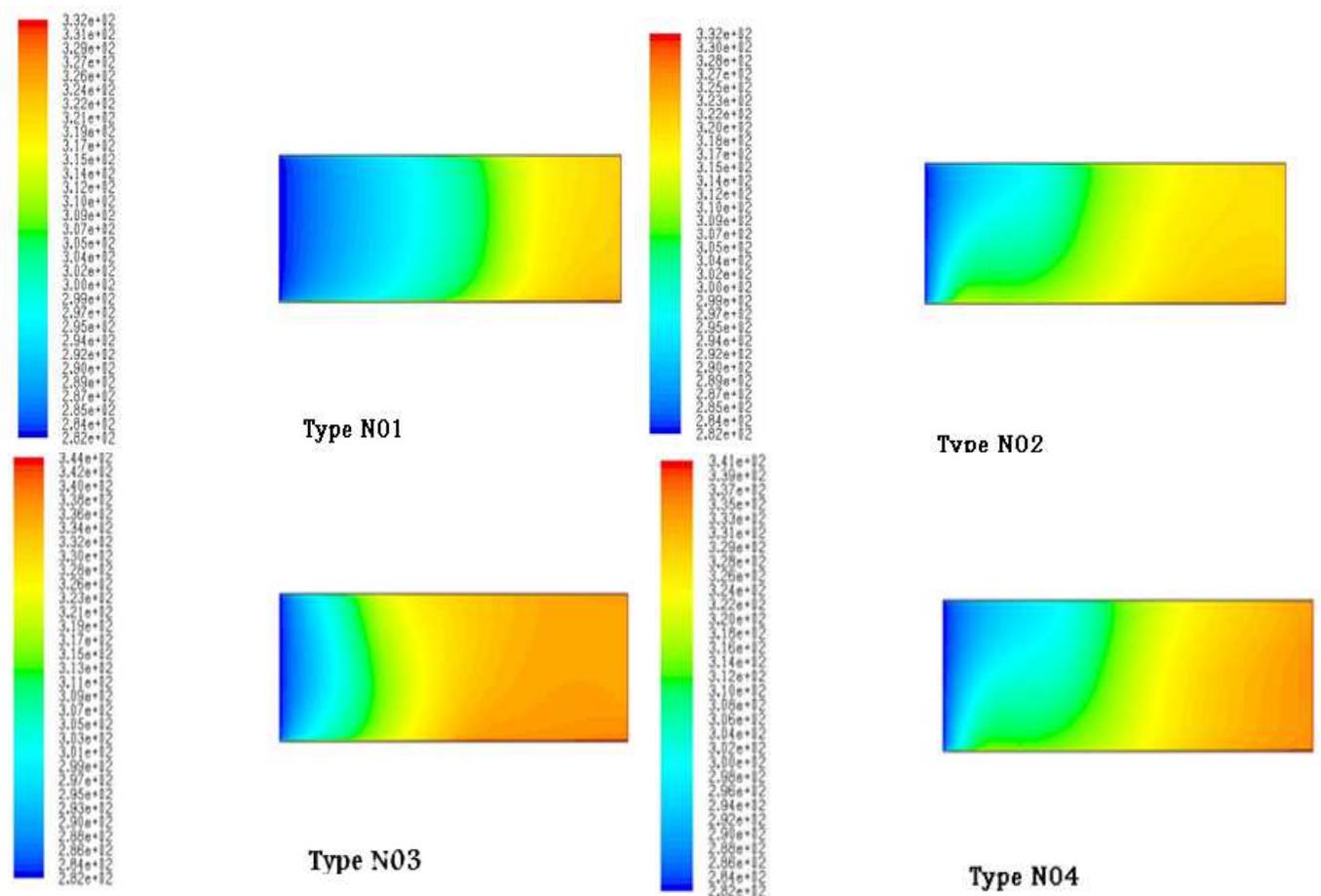


Figure IV.27 : Contours de Température pour les quatre types.

L'analyse des isothermes, (Figure IV.27), montre que la température de l'air dans les zones de sortie est sensiblement élevée.

Une baisse de température dans les zones situées en entrée est observée.

Les zones les plus chaudes sont, pour la plupart, localisées au voisinage des parois. Se qui permet un très bon transfert thermique entre les parois solides et le fluide caloporteur.

IV.2.1.4.1.5 Profils de Température:

Les profils de Température sont pris dans la section se trouvant au milieu ($x=0.12m$) de la veine fluide.

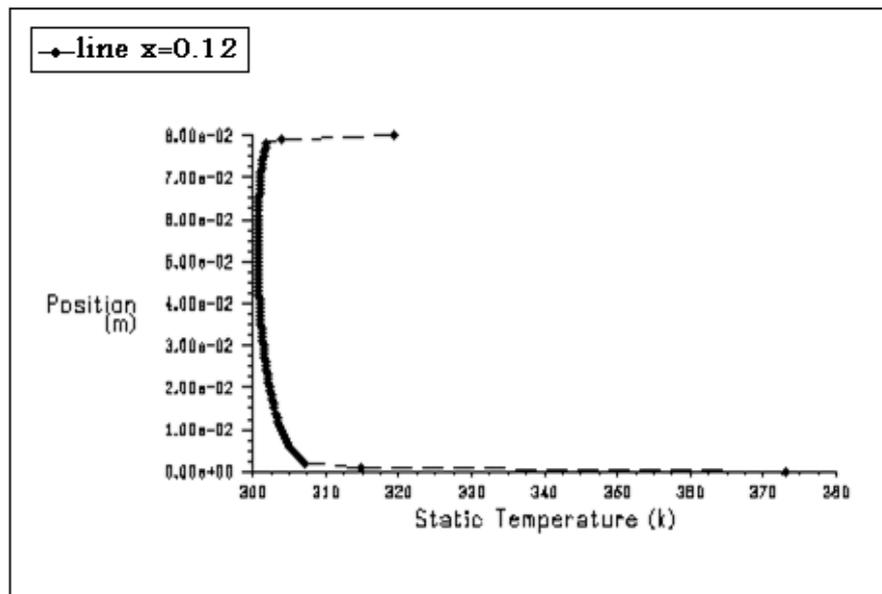


Figure IV.28: Profils de la Température ($x = 0,12 m$) Type N01.

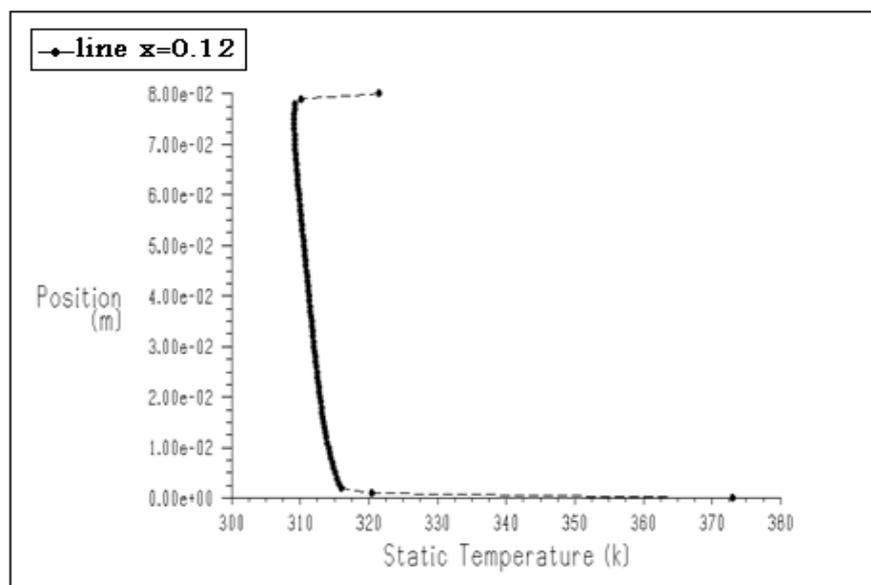


Figure IV.29: Profils de la Température ($x = 0,12 m$) Type N02.

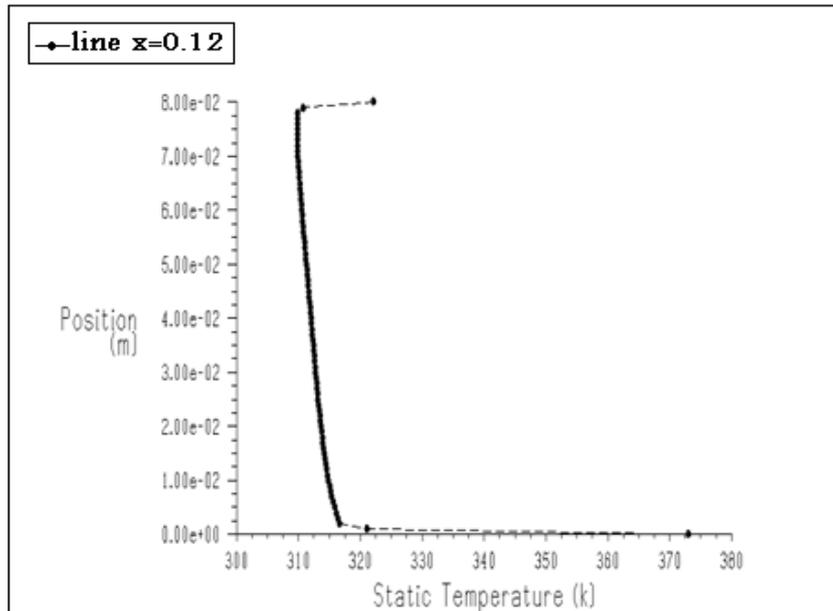


Figure IV.30: Profils de la Température ($x = 0,12$ m) Type N03.

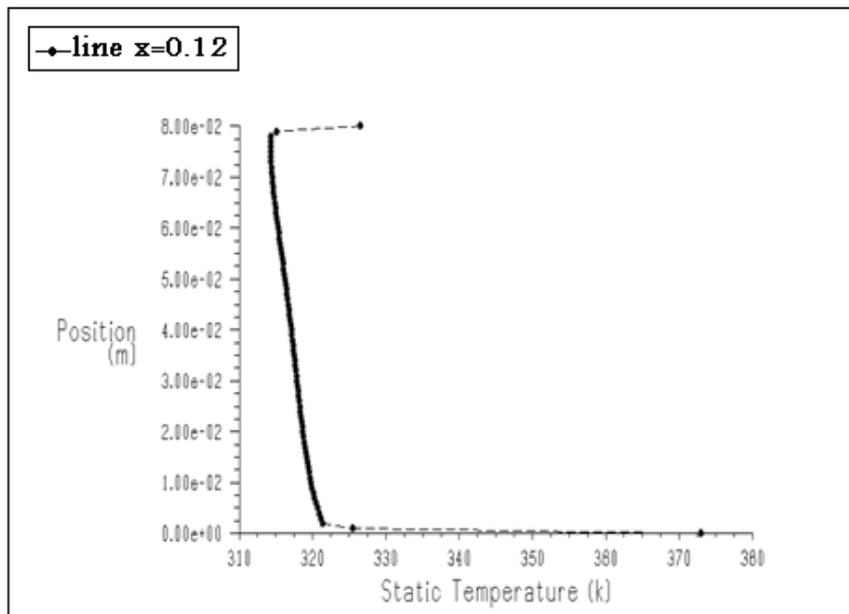


Figure IV.31: Profils de la Température ($x = 0,12$ m) Type N04.

On constate aussi que, les valeurs de la température sont augmentées par rapport à la température d'entrée, en raison de transfert de chaleur entre l'air et les parois supérieur et inférieur à cause du rayonnement.

IV.2.1.4.2 Le 2^{ème} Cas (Double vitrage) :

IV.2.1.4.2.1 Les conditions aux limites :

Tableau IV.3: « Les conditions aux limites du 2^{ème} cas des capteurs sans chicanes ».

| Le capteur N1 : | | | | | | Le capteur N2 : | | | | | |
|-----------------|-------|-------|-------------|---------------|----------------|-----------------|-------|-------|-------------|---------------|-----------------|
| U_e | T_e | T_s | P_s | k | ε | U_e | T_e | T_s | P_s | k | ε |
| 0.093 | 279 | 309 | <i>Patm</i> | $4.3.10^{-4}$ | 2.10^{-8} | 0.069 | 279 | 309 | <i>Patm</i> | $2.3.10^{-5}$ | $5.6.10^{-11}$ |
| Le capteur N3 : | | | | | | Le capteur N4 : | | | | | |
| U_e | T_e | T_s | P_s | k | ε | U_e | T_e | T_s | P_s | k | ε |
| 0.021 | 279 | 309 | <i>Patm</i> | $2.2.10^{-6}$ | $4.8.10^{-13}$ | 0.035 | 279 | 309 | <i>Patm</i> | 6.10^{-6} | $3.75.10^{-12}$ |

- Le flux de la paroi supérieure :

$$Q = 650W/m^2$$

- La température de l'isolant et des chicanes inférieures :

$$T_{iso} = 373K$$

IV.2.1.4.2.2 Champ de vitesse :

La figure IV.32 donne les champs de vitesses pour le cas des capteurs double vitrage pour les quatre types étudiés;

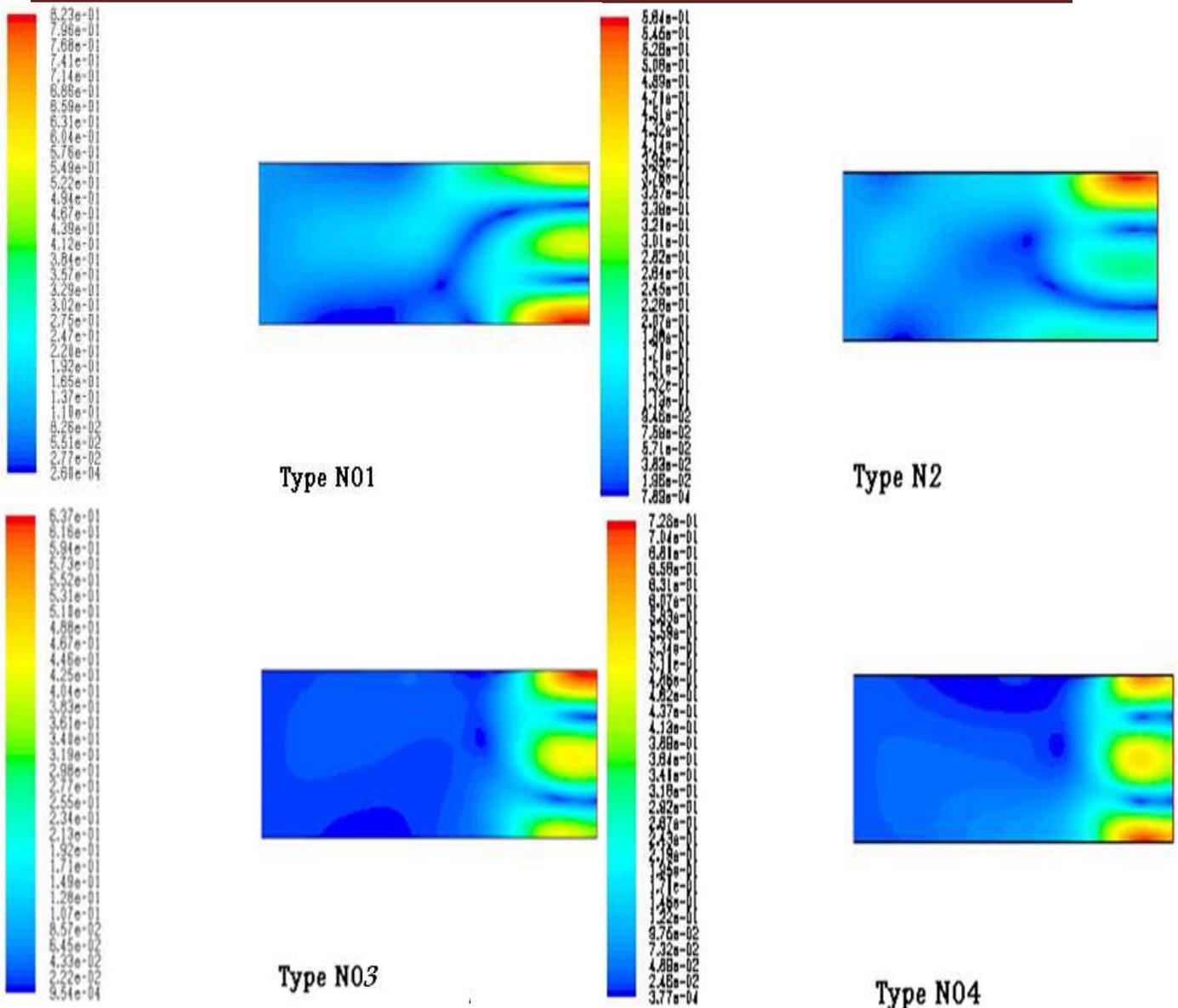


Figure IV.32 : Contours de vitesse pour les quatre types.

Les résultats numériques montrent que les valeurs de vitesses sont très faibles au voisinage de l'entrée (similaire aux résultats du 1^{ère} cas). On constate aussi une augmentation près de la sortie du capteur.

IV.2.1.4.2.3 Profils de vitesse :

La variation de vitesse pour ce cas apparaît clairement sur les contours et sur leurs échelles qui présentent des valeurs positives. Pour bien étudier cette évolution de vitesse axiale, on a tracé des courbes de vitesse axiales pour ces positions axiales $x=0.12\text{m}$ au milieu de la conduite.

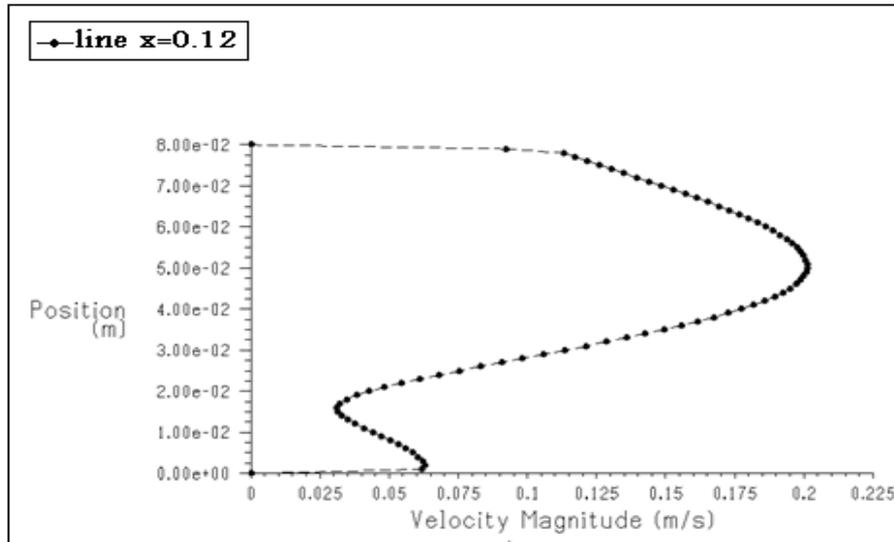


Figure IV.33 : Profils de la vitesse axiale au milieu $x=0.12\text{m}$, pour le Type N01.

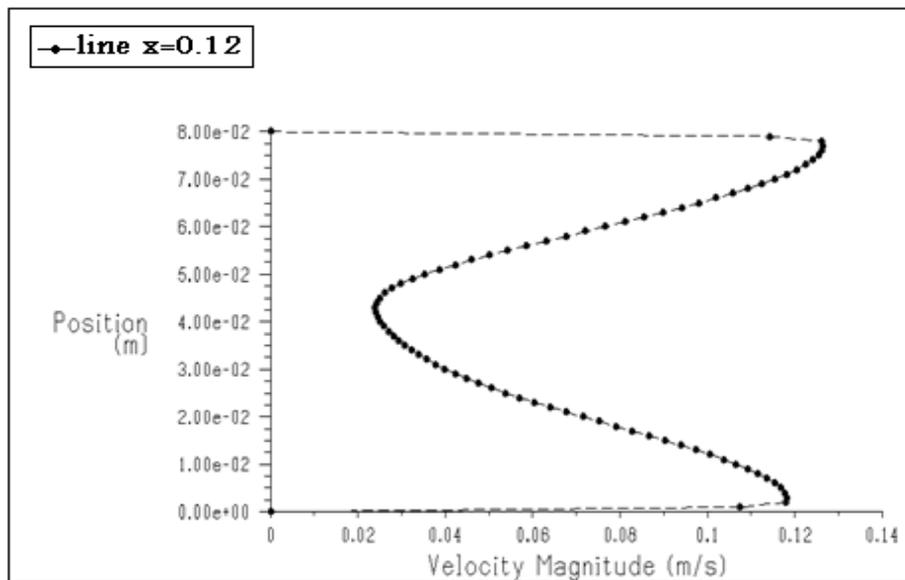


Figure IV.34 : Profils de la vitesse axiale au milieu $x=0.12\text{m}$, pour le Type N02.

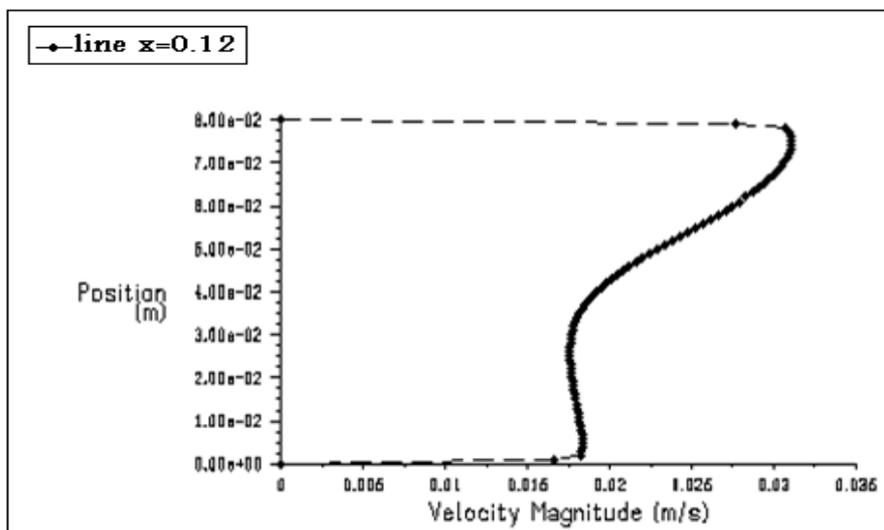


Figure IV.35 : Profils de la vitesse axiale au milieu $x=0.12\text{m}$, pour le Type N03.

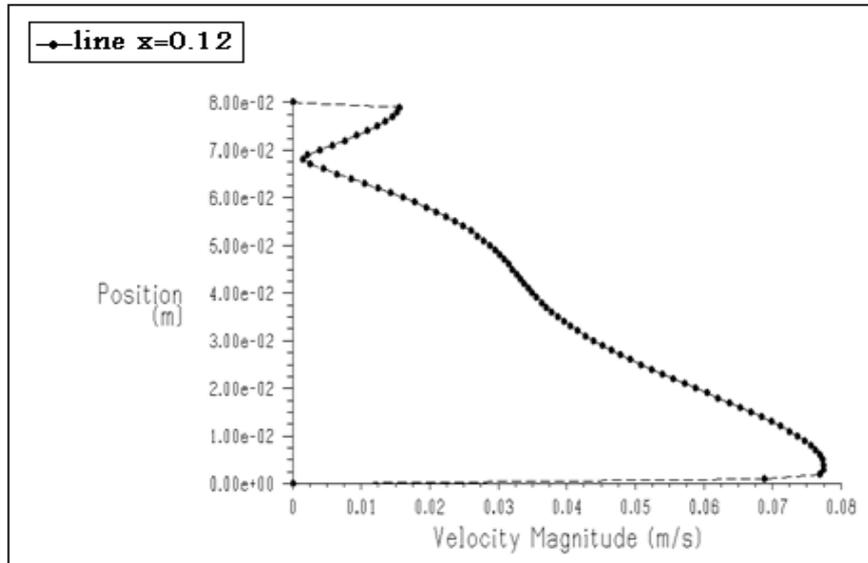


Figure IV.36 : Profils de la vitesse axiale au milieu $x=0.12\text{m}$, pour le Type N04.

Les résultats numériques représentés par les profils de vitesse axiale au milieu du capteur dans les différents types traités, sont indiquées dans les figures (IV.33, IV.34, IV.35 et IV.36).

On constate que les valeurs de la vitesse axiale sont réduites par rapport à la vitesse d'entrée.

Les valeurs maximales de la vitesse axiale atteignent environ 0.82m/s , soit 6 fois plus élevées que la vitesse d'entrée (0.093m/s).

IV.2.1.4.2.4 Champ de Température :

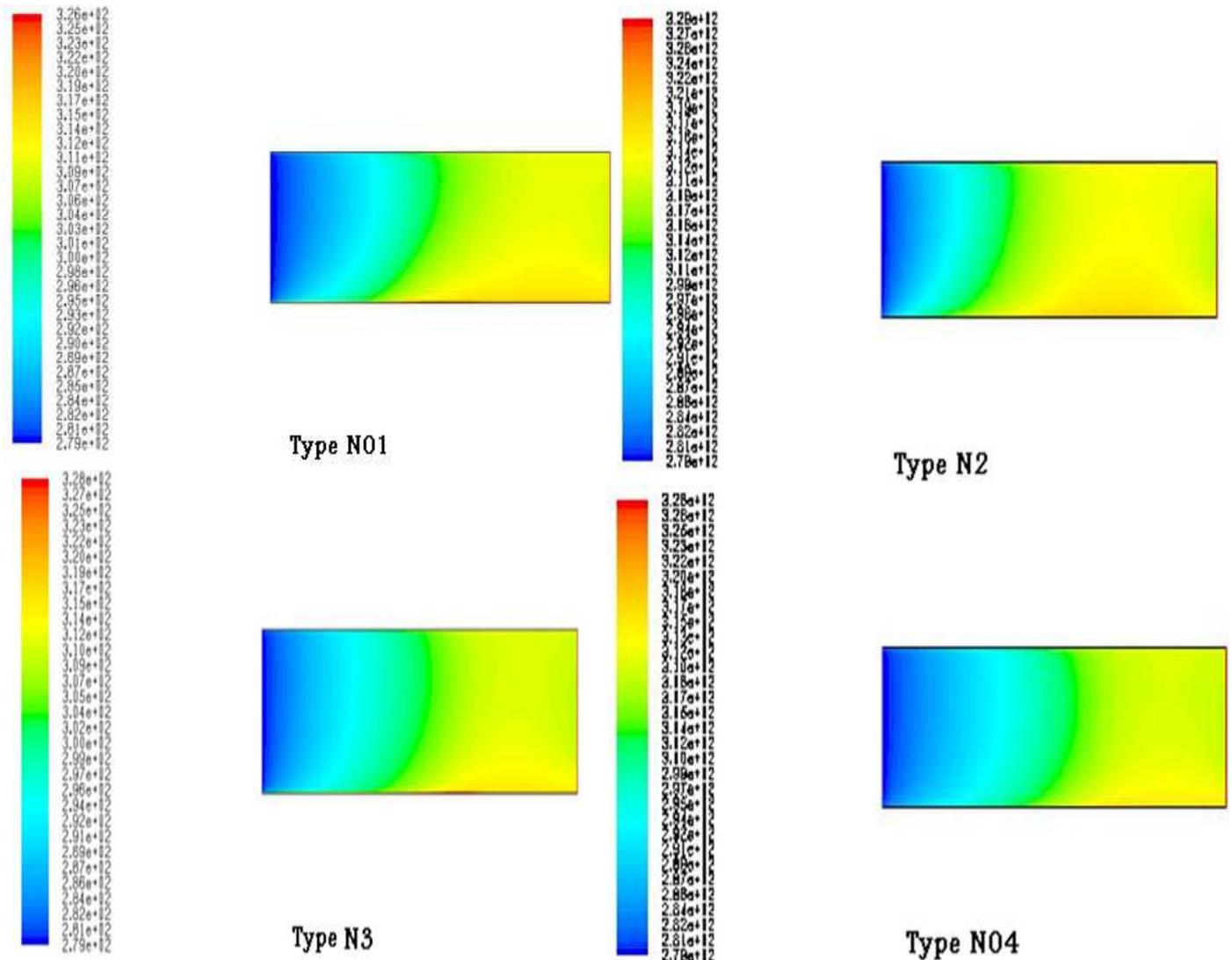


Figure IV.37 : Contours de Température pour les quatre types.

Le champ de température totale pour ce cas est indiqué sur la figure IV.37. Les zones les plus chaudes sont pour la plupart, localisées au voisinage des parois et a la sortie de capteur donc, elle est étroitement liée avec la valeur de la température extérieure de l'air, à la température de la vitre ainsi qu'à la valeur de la température de l'isolant.

IV.2.1.4.2.5 Profils de température :

La variation de la température pour le cas des capteurs double vitre apparaît clairement sur les contours et sur leurs échelles. Pour bien étudier cette évolution, on a tracé des courbes de température pour la section : $x=0.12m$.

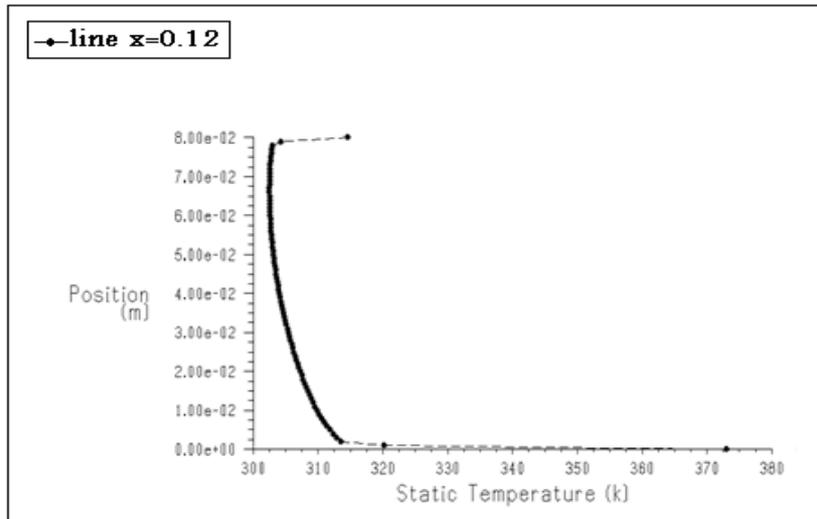


Figure IV.38 : Profils de la température au milieu $x=0.12m$, pour le Type N01.

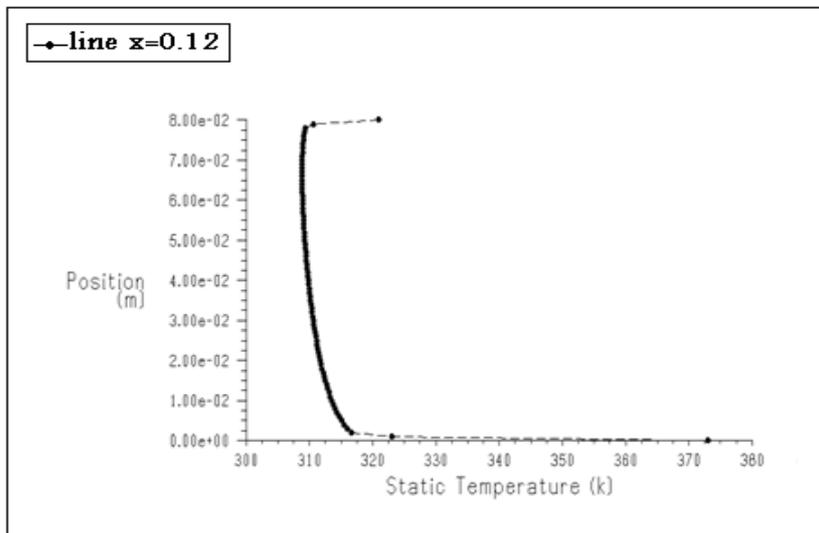


Figure IV.39 : Profils de la température au milieu $x=0.12m$, pour le Type N02.

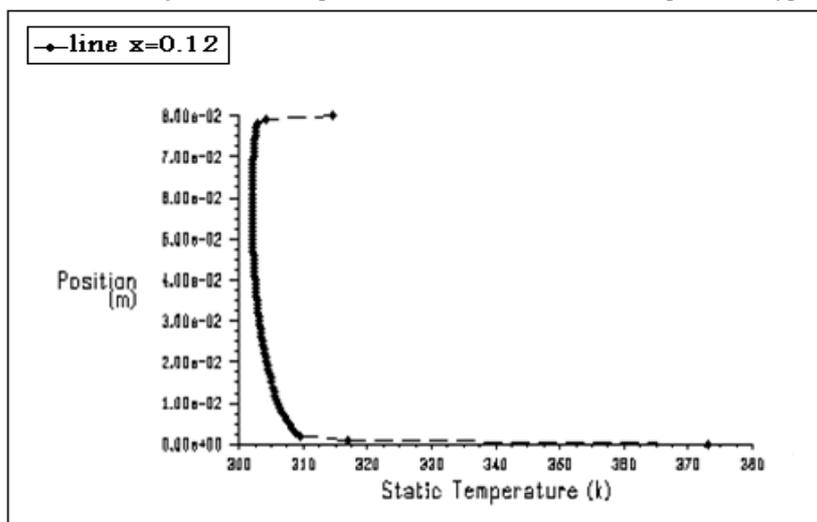


Figure IV.40 : Profils de la température au milieu $x=0.12m$, pour le Type N03.

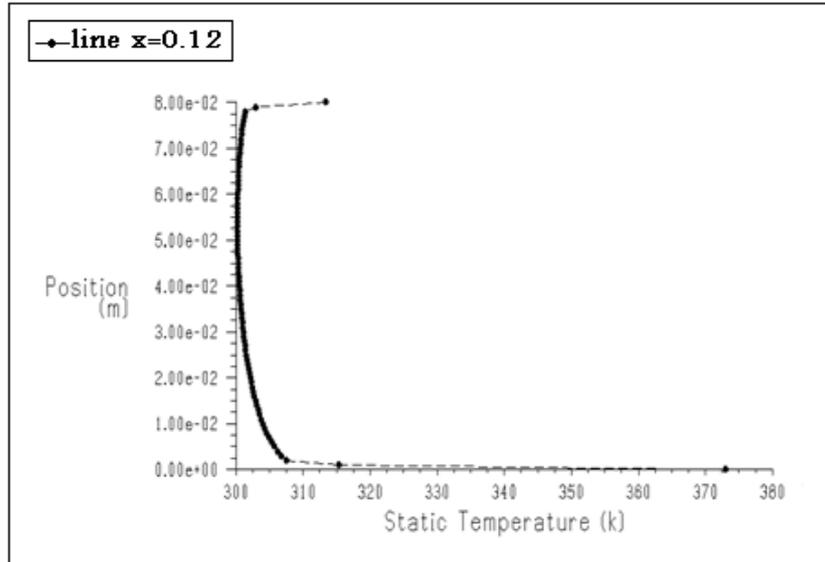


Figure IV.41: Profils de la température au milieu $x=0.12m$, pour le Type N04.

Les figures (IV.38, IV.39, IV.40 et IV.41) présentent les profils de la température totale au milieu du capteur dans la section à $x=0.12 m$.

On observe aussi que les sections les plus proches des murs et à la sortie sont les mieux chauffées parce qu'elles contiennent la plus grande zone de réchauffement.

Les résultats numériques montrent aussi que l'utilisation de deux vitres a conduit à une nette amélioration du transfert de chaleur dans le conduit de la veine d'air du capteur.

D'après l'analyse des allures des graphes de la température et ceux de la vitesse axiale des deux cas pour la section du milieu des différents types de capteurs, on remarque que la température est liée à la vitesse, plus la vitesse augmente, plus la température diminue.

Autrement dit qu'il y a une proportionnalité inverse entre la vitesse axiale de l'air et sa température dans chaque section transversale.

Cette observation est encore confirmée pour la distribution du champ de température dans la veine fluide du capteur (Figure IV.37).

IV.2.2 Etude de l'écoulement dans des capteurs solaires avec chicanes rectangulaires :

Pour améliorer le rendement du capteur solaire, compte tenu des faibles caractéristiques thermo physiques du fluide caloporteur qu'est l'air, (il a en effet une capacité calorifique quatre fois moindre que celle de l'eau), nous avons développé sous l'absorbeur un réseau d'obstacles ou chicanes, dont la fonction est de rallonger le parcours de l'air plus froid prélevé dans le bas de la pièce, et de le ralentir pour lui laisser

le temps d'être plus longuement en contact avec la face chaude de l'absorbeur. Cet air réchauffé sera ensuite réintroduit dans le local en partie haute.

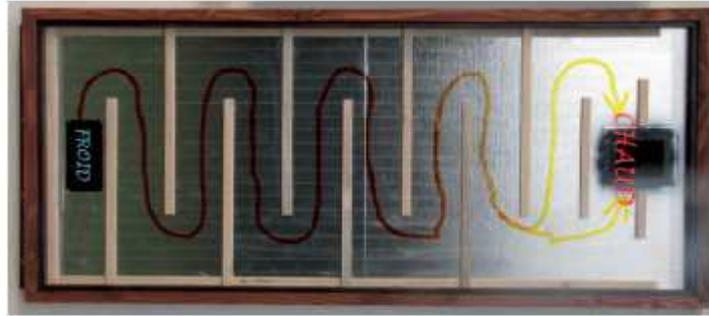


Figure IV.42: Disposition des chicane sous l'absorbeur [8].

IV.2.2.1 Description de la géométrie :

Le problème consiste comme cité auparavant à l'analyse et l'étude du comportement d'un écoulement d'air en convection forcée turbulente passant dans un canal rectangulaire de longueur L muni d'ailettes et de chicane transversales.

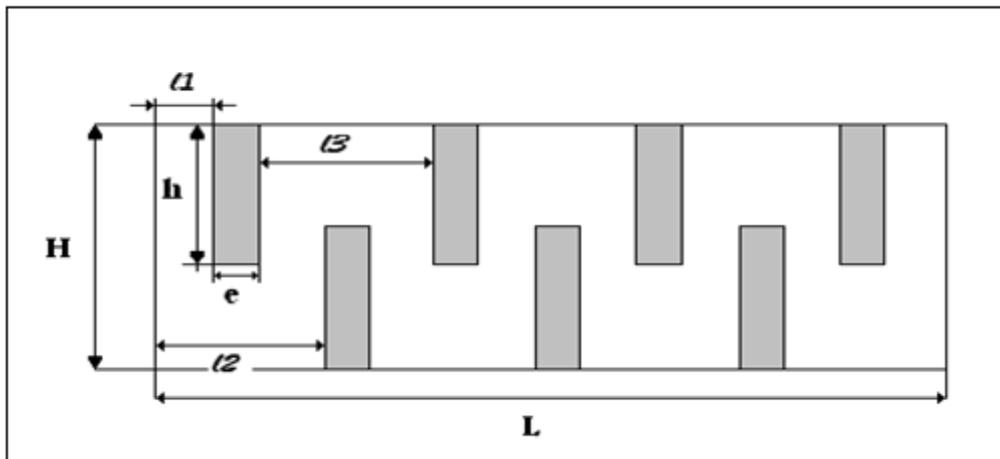


Figure IV.43-a: La géométrie étudiée.

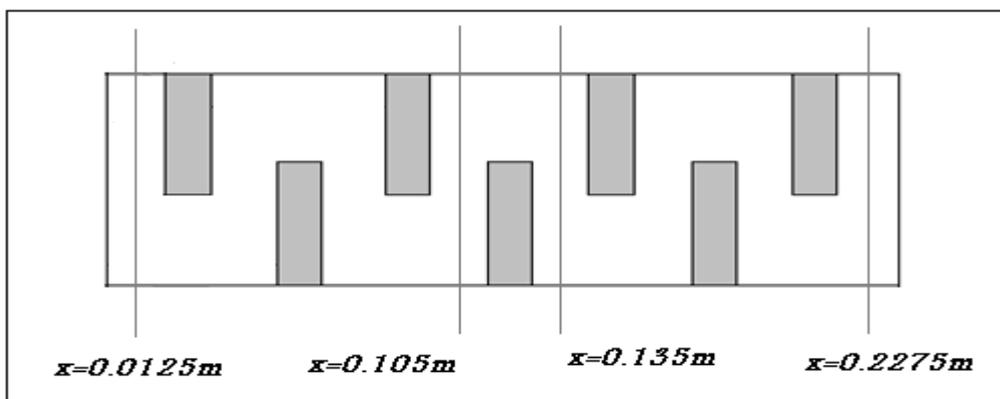


Figure IV.43-b: Les sections étudiées.

Les dimensions de la configuration du capteur étudié sont :

- La hauteur des chicanes : $h = 0.08$ m
- L'espace entre l'entrée et la chicane supérieure : $l_1 = 0.025$ m
- L'espace entre l'entrée et la première chicane inférieure : $l_2 = 0.055$ m
- L'espace entre les deux chicanes : $l_3 = 0.05$ m
- L'espace entre la chicane inférieure et la sortie : $l_4 = 0.025$ m
- L'épaisseur des chicanes : $e_{chi} = 0.01$ m.

IV.2.2.2 Les conditions aux limites :

En résumé les conditions aux limites dans le tableau suivant :

Tableau IV.4 : « Les conditions aux limites des capteurs avec chicanes rectangulaires ».

| Le capteur N1 : | | | | | | Le capteur N2 : | | | | | |
|-----------------|-------|-------|-------------|---------------------|--------------------|-----------------|-------|-------|-------------|---------------------|----------------------|
| U_e | T_e | T_s | P_s | k | ε | U_e | T_e | T_s | P_s | k | ε |
| 0.093 | 279 | 309 | <i>Patm</i> | $4.5 \cdot 10^{-5}$ | $2 \cdot 10^{-10}$ | 0.035 | 279 | 309 | <i>Patm</i> | $0.6 \cdot 10^{-5}$ | $3.6 \cdot 10^{-12}$ |
| Le capteur N3 : | | | | | | Le capteur N4 : | | | | | |
| U_e | T_e | T_s | P_s | k | ε | U_e | T_e | T_s | P_s | k | ε |
| 0.017 | 279 | 309 | <i>Patm</i> | $1.4 \cdot 10^{-6}$ | $2 \cdot 10^{-13}$ | 0.052 | 279 | 309 | <i>Patm</i> | $1.3 \cdot 10^{-6}$ | $1.8 \cdot 10^{-11}$ |

- Le flux de la paroi supérieure :

$$Q = 650W/m^2$$

- La température de l'isolant et de la chicane inférieure :

$$T_{iso} = 373K$$

IV.2.2.3 Discussion :

IV.2.2.3.1 Champ de vitesse :

Le champ de vitesse est représenté par les contours des vitesses axiales dans la figure IV.44.

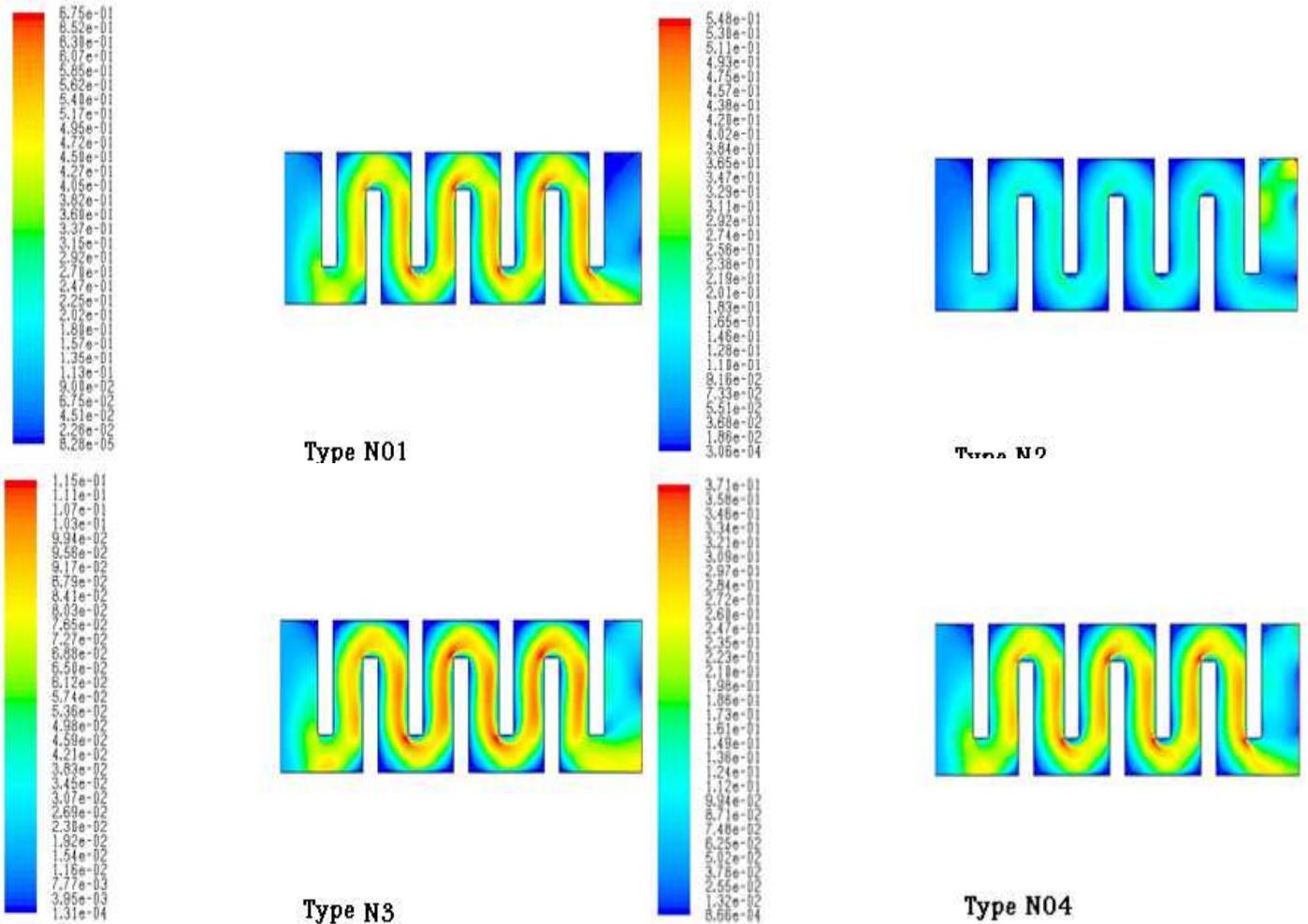


Figure IV.44 : Profils de la vitesse pour les quatre types.

Les résultats numériques montrent que les valeurs les plus faibles de la vitesse sont au voisinage des chicanes.

Dans les régions situées en aval des chicanes, des zones de recirculation avec des valeurs de vitesses négatives très faible sont observées.

Dans les régions entre la pointe de la chicane et les parois du canal, la vitesse est augmentée, en raison du rétrécissement de la section du passage du fluide.

Les plus hautes valeurs de la vitesse apparaissent près du haut du Canal avec un processus d'accélération qui commence juste après la seconde chicane.

IV.2.2.3.2 Profil de vitesse :

Quatre sections ont été choisies pour l'étude hydrodynamique et thermique. Elles sont respectivement : $x=0.0125m$, $x=0.105m$, $x=0.135m$ et $x=0.2275m$, par rapport à l'entrée du canal ($x=0m$).

Pour les sections : $x=0.0125m$

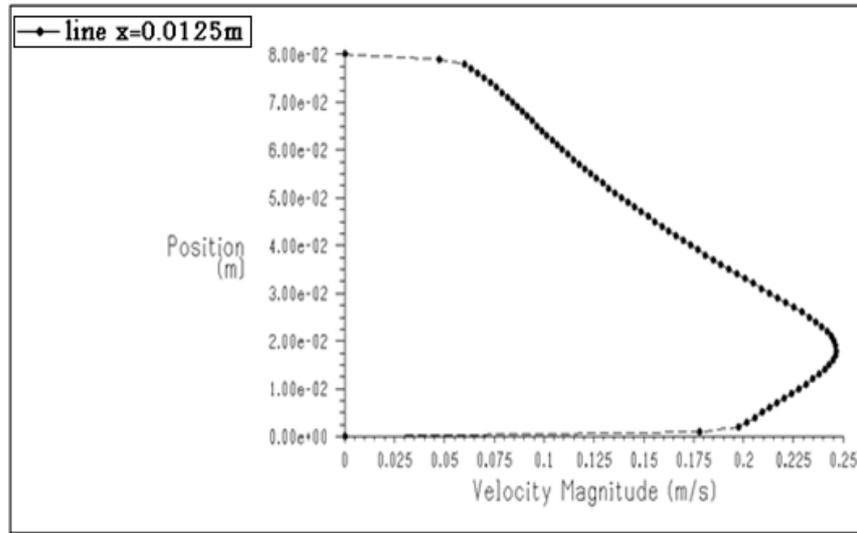


Figure IV.45: Profils de la vitesse en amont de la première ailette ($x=0.0125m$), pour le Type N01.

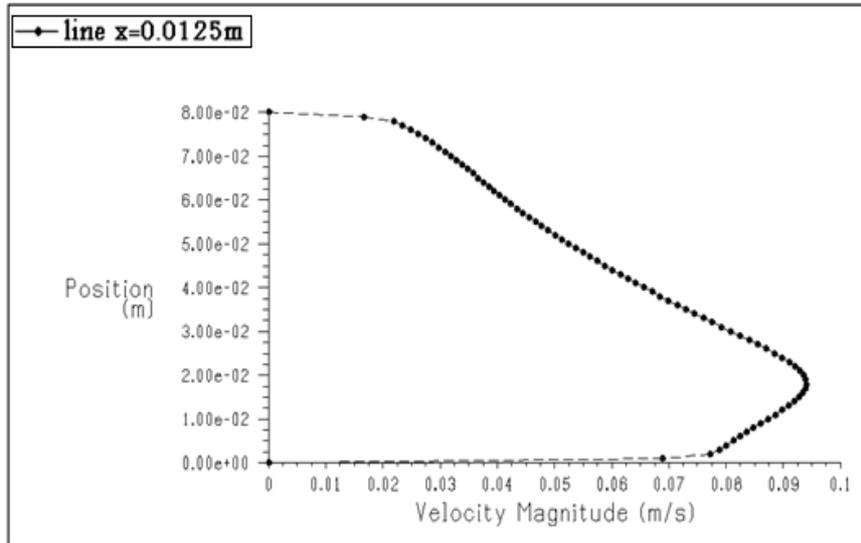


Figure IV.46 : Profils de la vitesse en amont de la première ailette ($x=0.0125m$), pour le Type N02.

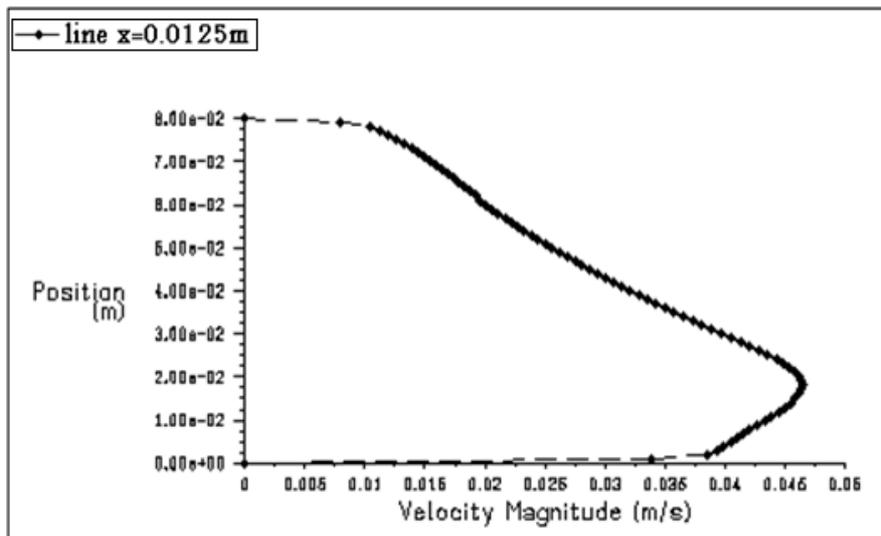


Figure IV.47: Profils de la vitesse en amont de la première ailette ($x=0.0125m$), pour le Type N03.

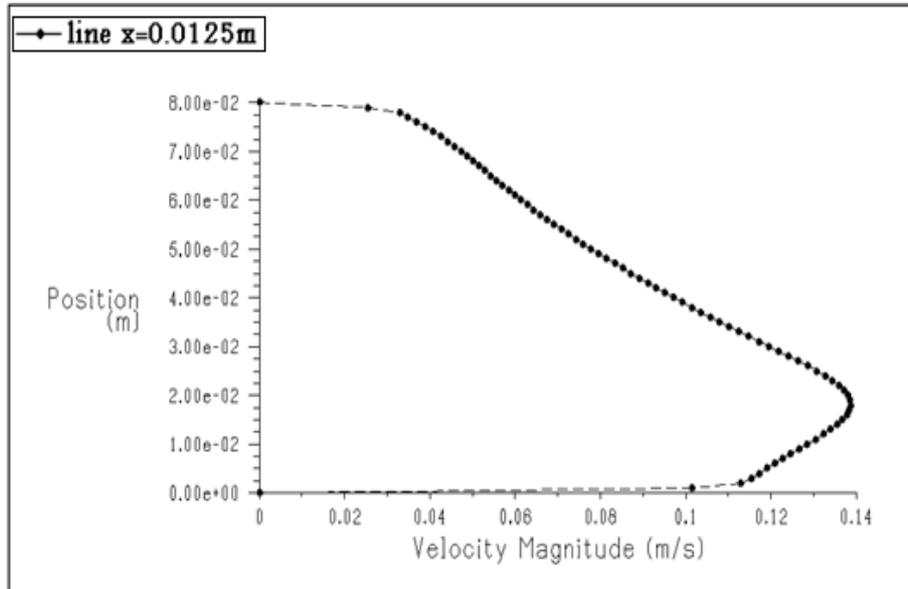


Figure IV.48: Profils de la vitesse en amont de la première ailette ($x=0.0125m$), pour le Type N04.

Pour la section $x = 0,0125m$ située en amont de la première ailette, les valeurs de la vitesse axiale sont réduites par rapport à la vitesse d'entrée. La déformation de la circulation augmente la vitesse du fluide en s'approchant du passage sous l'ailette (Figure IV.45, IV.46, IV.47 et IV.48).

Pour les sections : $x=0.105m$ et $x=0.135m$

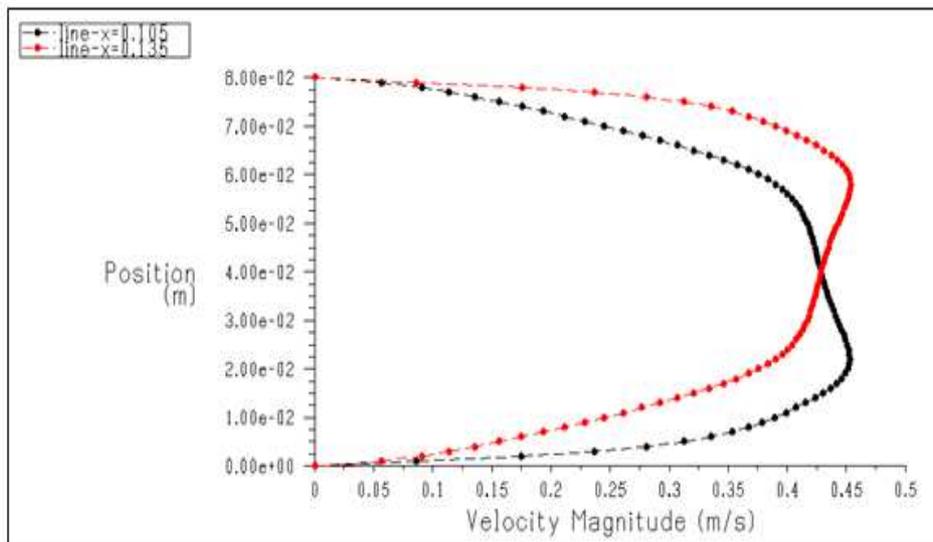


Figure IV.49 : Profils de la vitesse à $x=0.105m$ et $x=0.135m$, pour le Type N01.

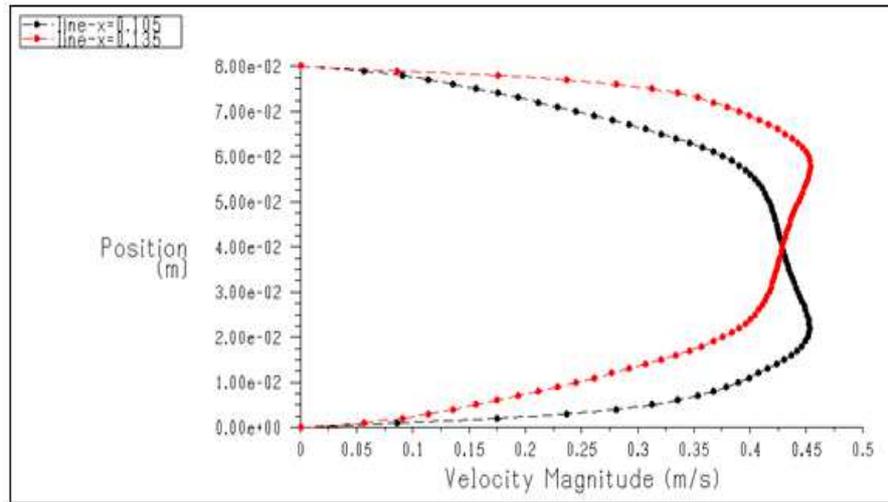


Figure IV.50: Profils de la vitesse à $x=0.105m$ et $x=0.135m$, pour le Type N02.

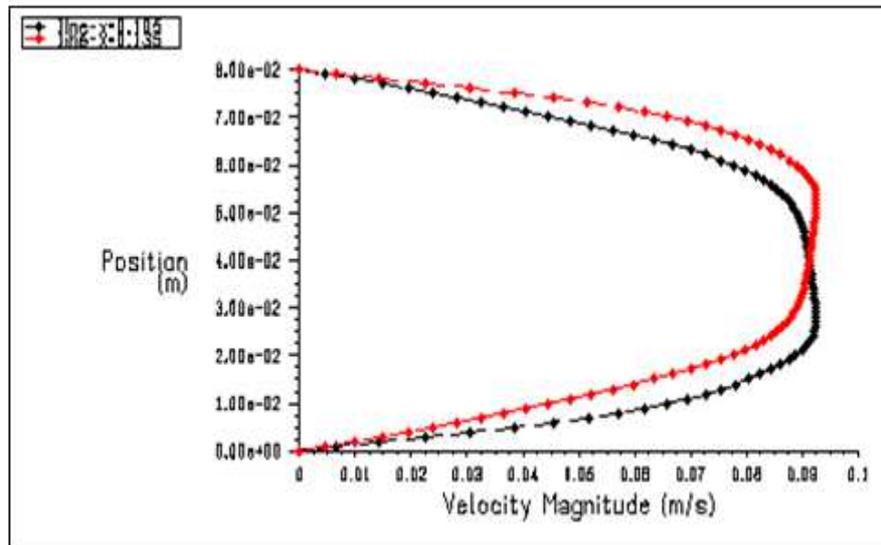


Figure IV.51 : Profils de la vitesse à $x=0.105m$ et $x=0.135m$, pour le Type N03.

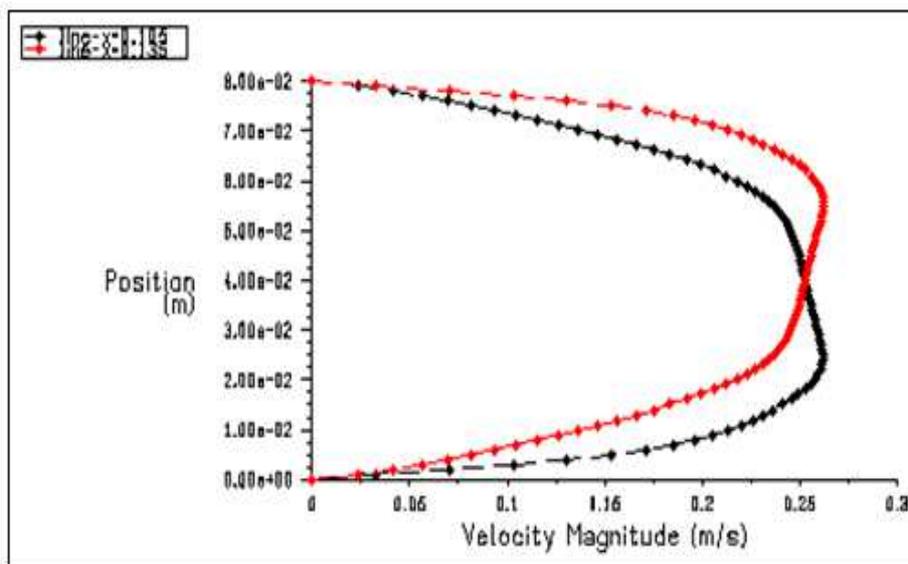


Figure IV.52 : Profils de la vitesse à $x=0.105m$ et $x=0.135m$, pour le Type N04.

Chapitre IV : Résultats et Discussions.

Entre la troisième et la quatrième chicanes, dans les sections $x = 0,105\text{ m}$ et $x = 0,135\text{ m}$; situées en amont de la troisième ailette et en aval de la quatrième, le fluide est caractérisé par des vitesses très élevées dans le segment libre.

Pour la section : $x=0.2275\text{ m}$

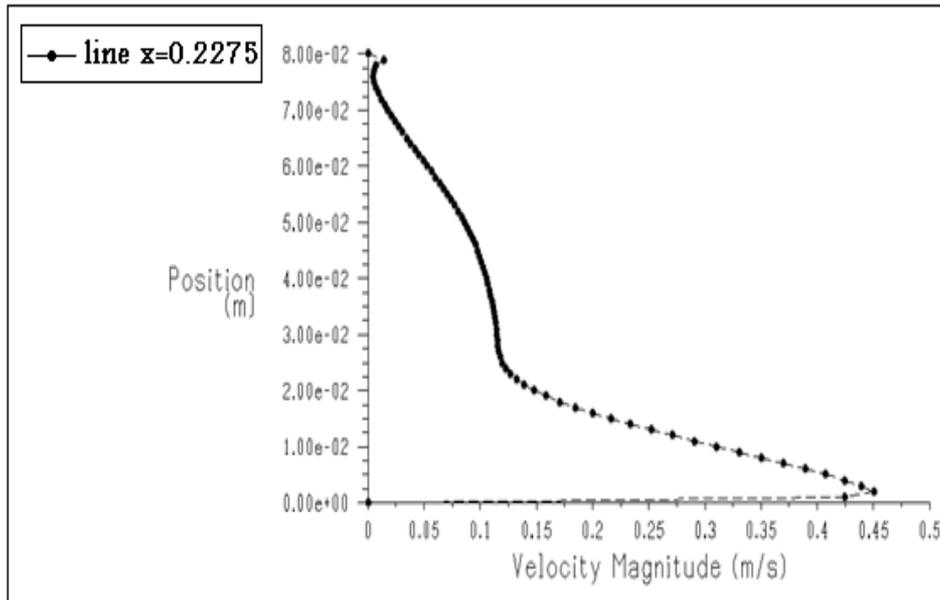


Figure IV.53 : Profils de la vitesse à $x=0.2275\text{ m}$, pour le Type N01.

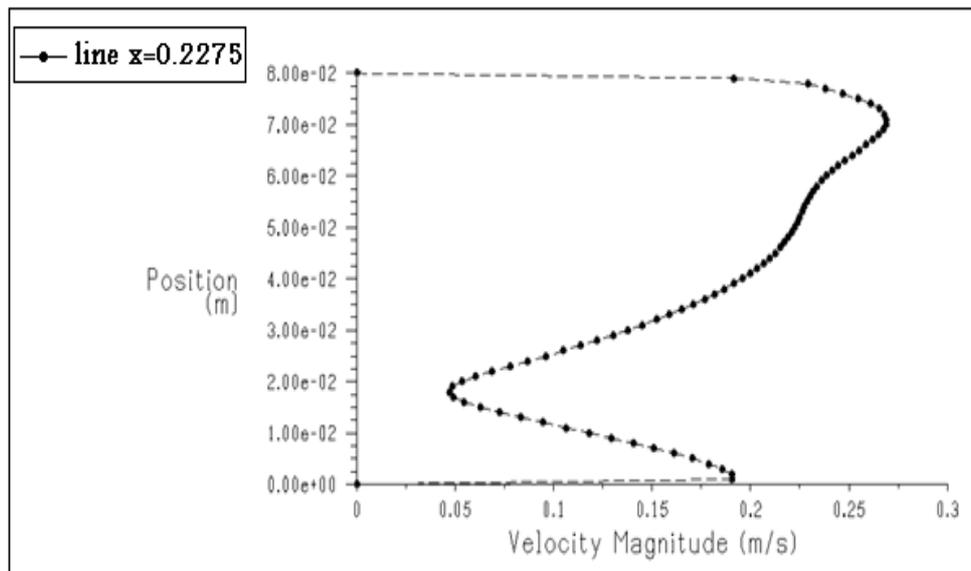


Figure IV.54 : Profils de la vitesse à $x=0.2275\text{ m}$, pour le Type N02.

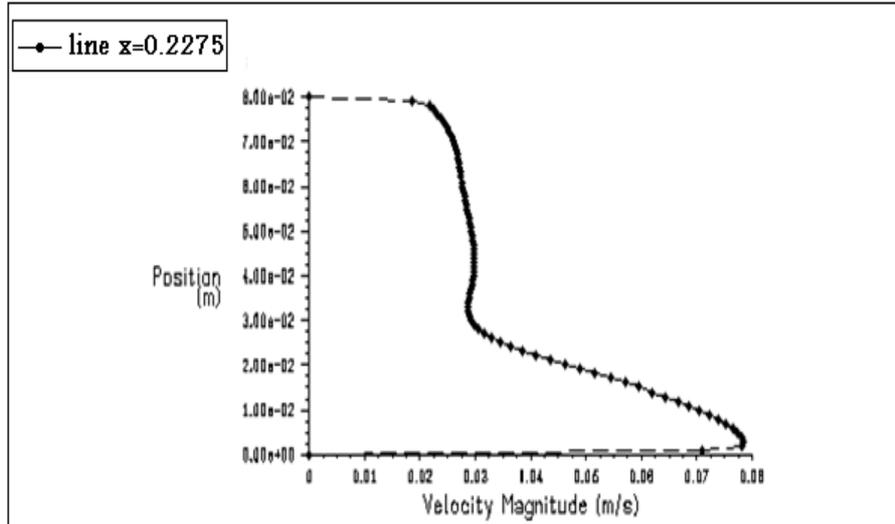


Figure IV.55 : Profils de la vitesse à $x=0.2275\text{m}$, pour le Type N03.

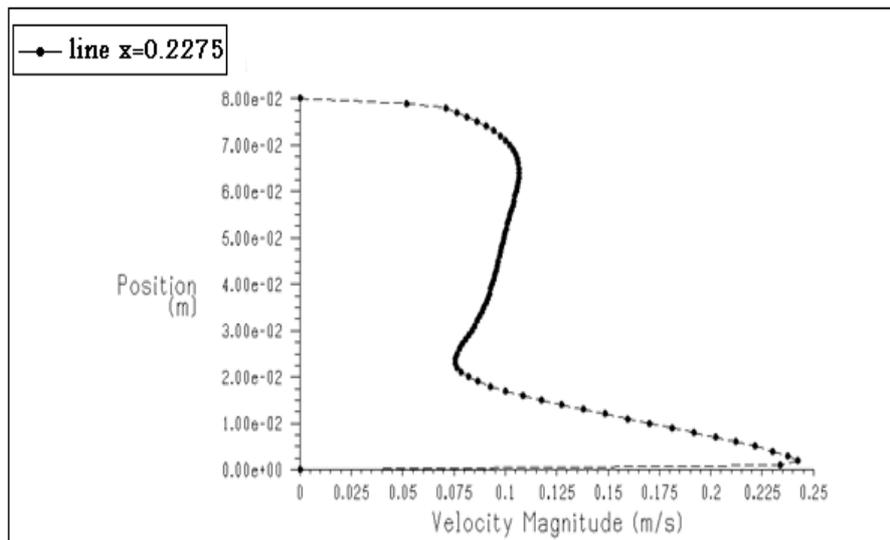


Figure IV.56 : Profils de la vitesse à $x=0.2275\text{m}$, pour le Type N04.

Les Figures (IV.53, IV.54, IV.55 et IV.56) montrent les profils de la vitesse à la section $x=0,2275\text{m}$ située en aval de la dernière ailette.

A cet endroit, les résultats montrent que, comme le flux s'approche de la deuxième chicane, la vitesse est réduite dans la partie supérieure de la chicane tandis qu'elle augmente dans la partie inférieure.

IV.2.2.3.3 Champ de Température :

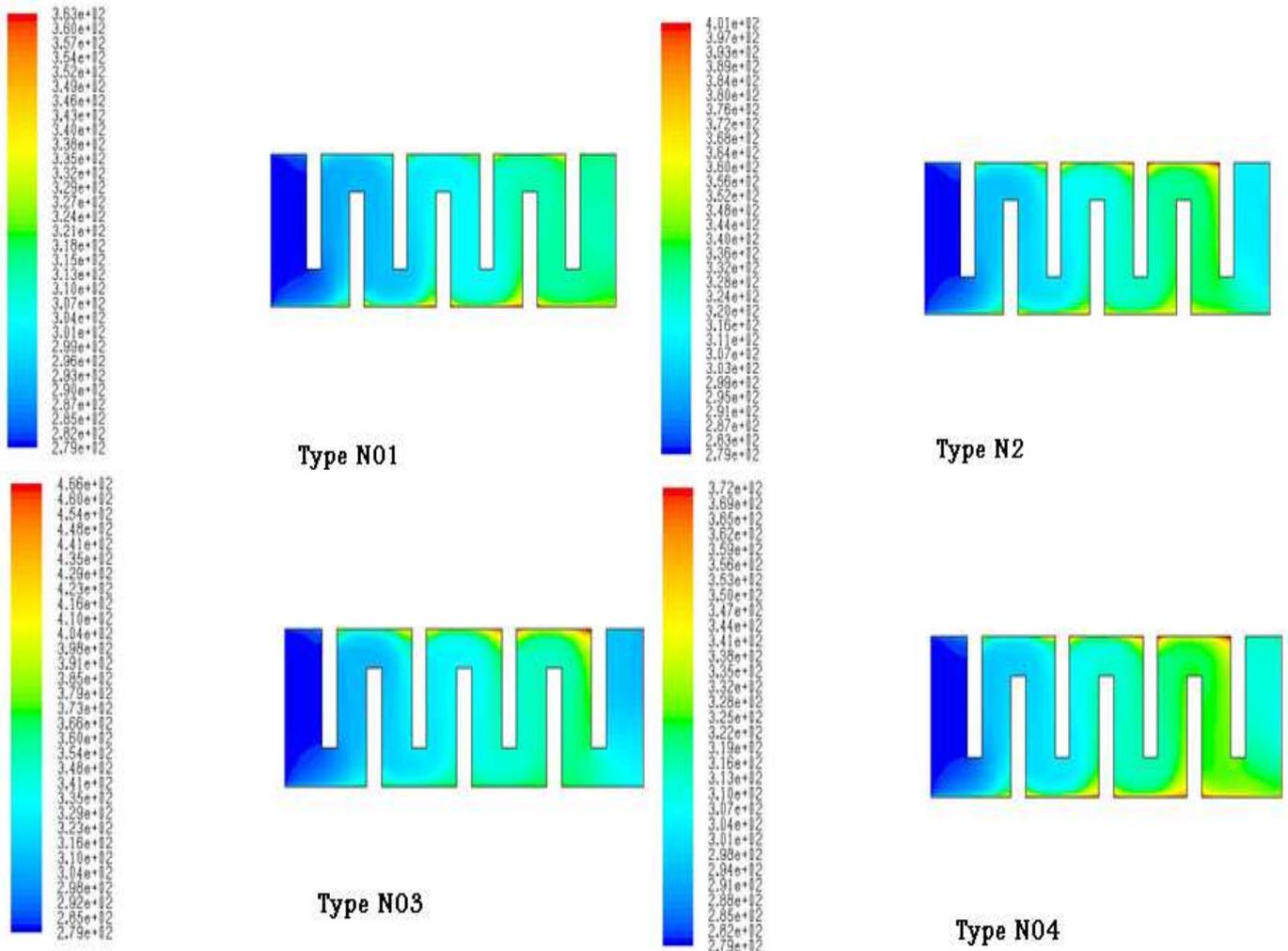


Figure IV.57 : le champ de température.

Les champs de températures sont donnés par la figure IV.57. La température devient importante juste en aval de la deuxième chicane; dans le dernier type (04) les températures prennent des valeurs importantes et progressives ($T=340K$).

IV.2.2.3.4 Profil de Température :

Ces profils sont représentés par les figures (IV.58, IV.59, IV.60, IV.61, IV.62, IV.63, IV.64, IV.65, IV.66, IV.67, IV.68 et IV.69).

Pour $x=0.0125m$

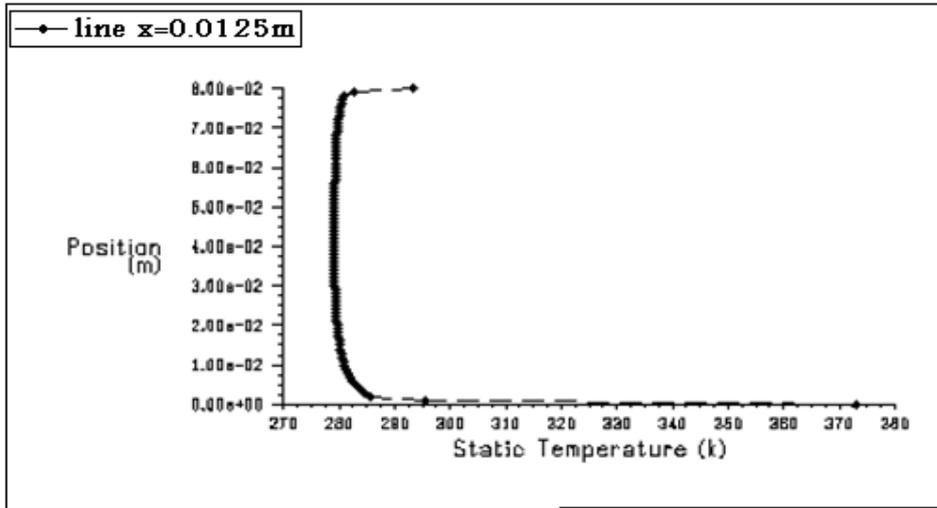


Figure IV.58 : Profils de la température à $x=0.0125m$, pour le Type N01.

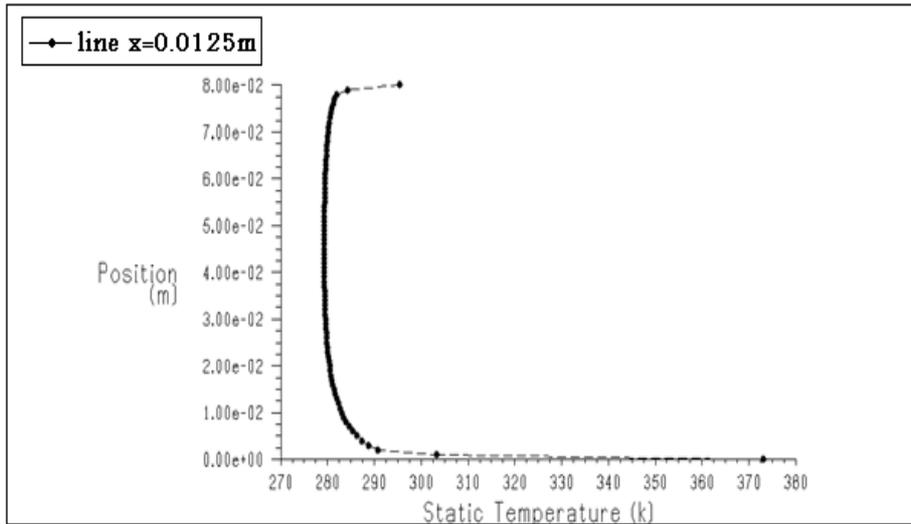


Figure IV.59 : Profils de la température à $x=0.0125m$, pour le Type N02.

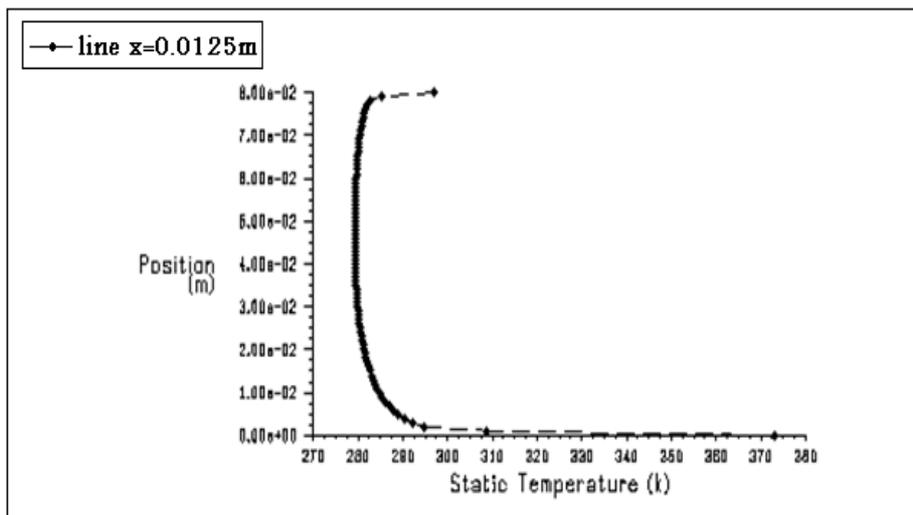


Figure IV.60: Profils de la température à $x=0.0125m$, pour le Type N03.

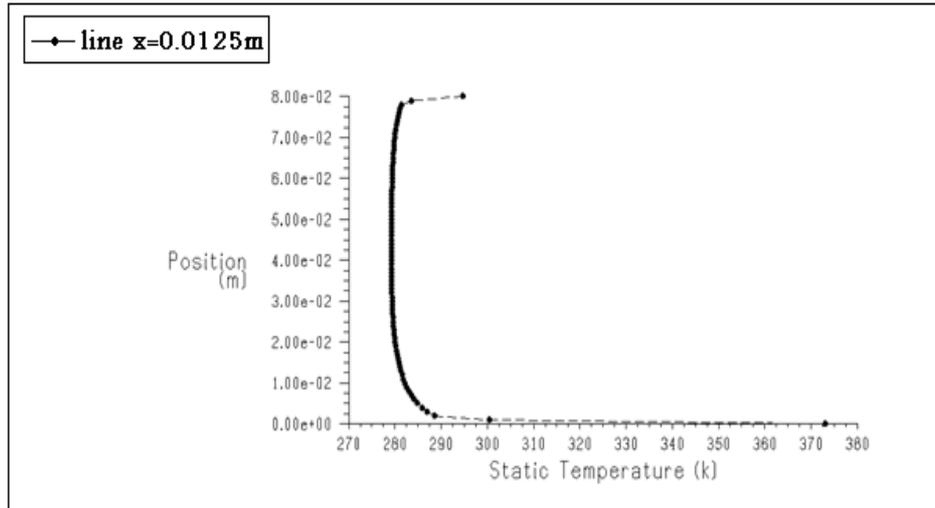


Figure IV.61 : Profils de la température à $x=0.0125\text{m}$, pour le Type N04.

Pour $x=0.105\text{m}$ et $x=0.135\text{m}$.

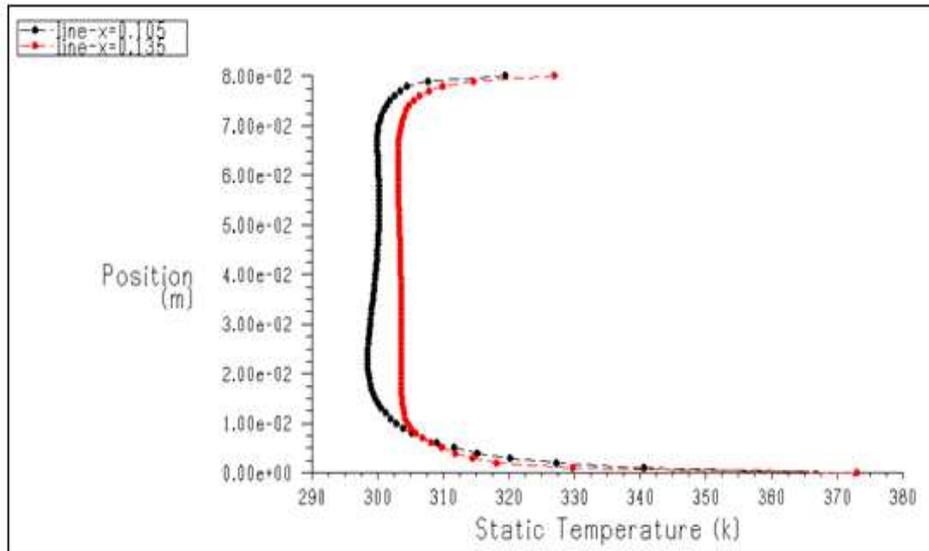


Figure IV.62 : Profils de la température à $x=0.105\text{m}$ et $x=0.135\text{m}$, pour le Type N01.

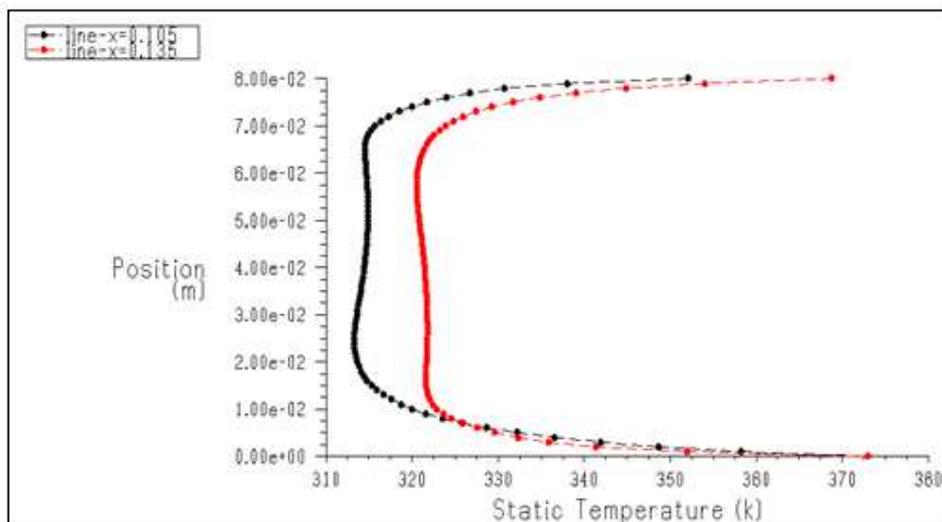


Figure IV.63 : Profils de la température à $x=0.105\text{m}$ et $x=0.135\text{m}$, pour le Type N02.

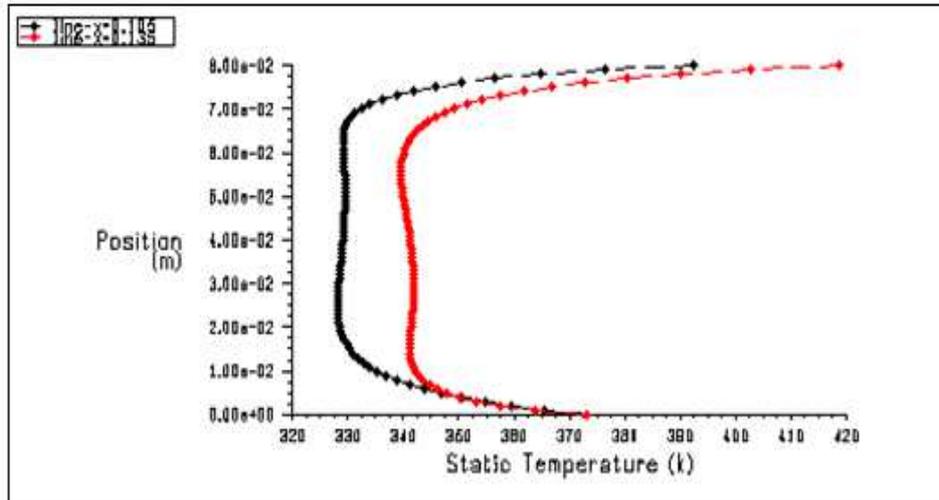


Figure IV.64 : Profils de la température à $x=0.105\text{m}$ et $x=0.135\text{m}$, pour le Type N03.

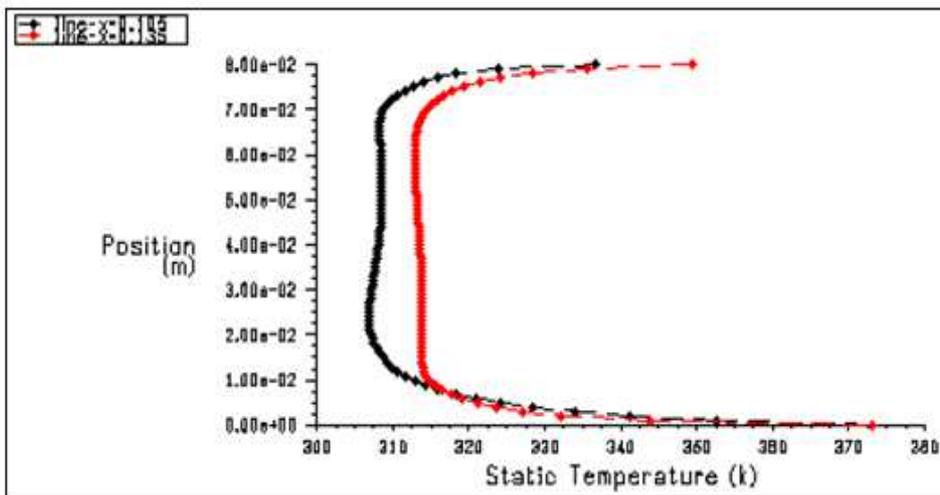


Figure IV.65 : Profils de la température à $x=0.105\text{m}$ et $x=0.135\text{m}$, pour le Type N04.

Pour $x=0.2275\text{m}$.

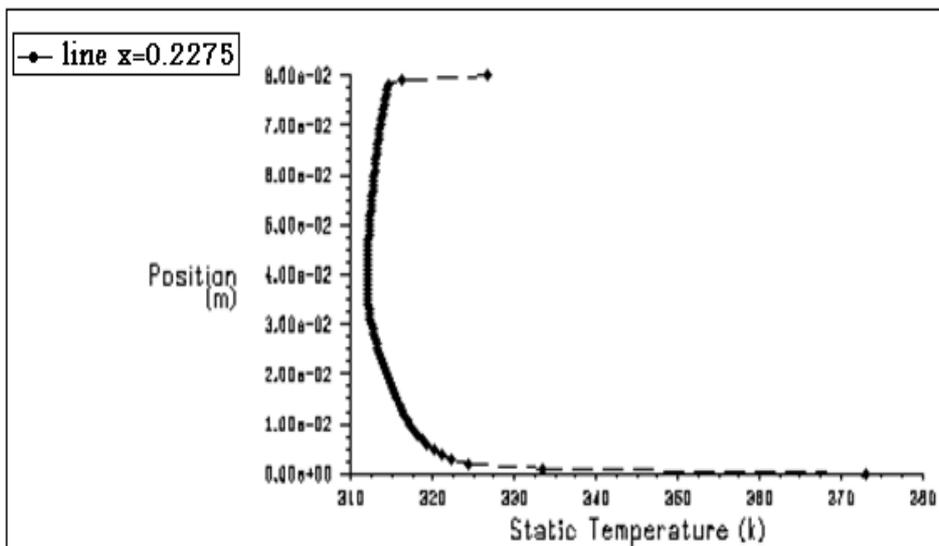
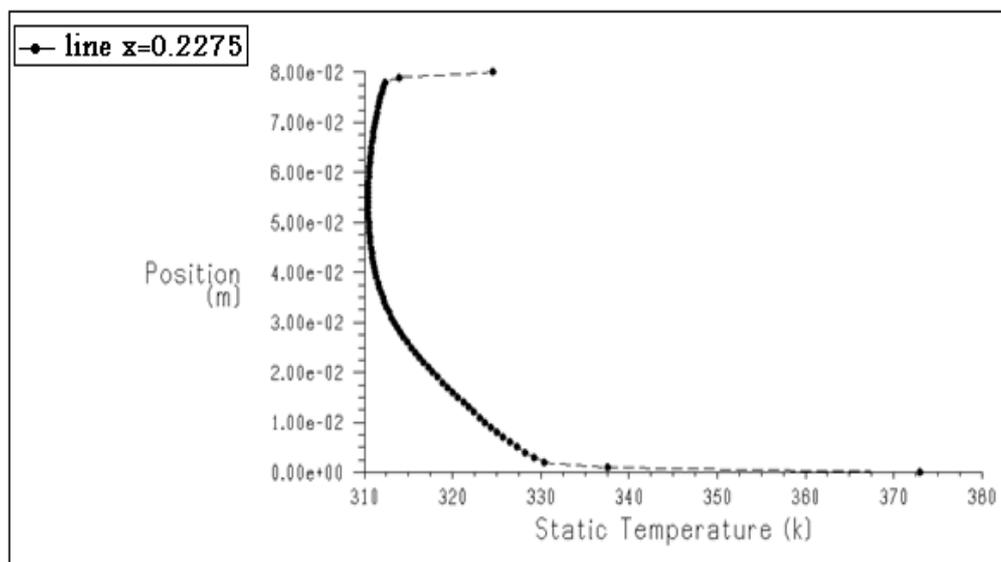
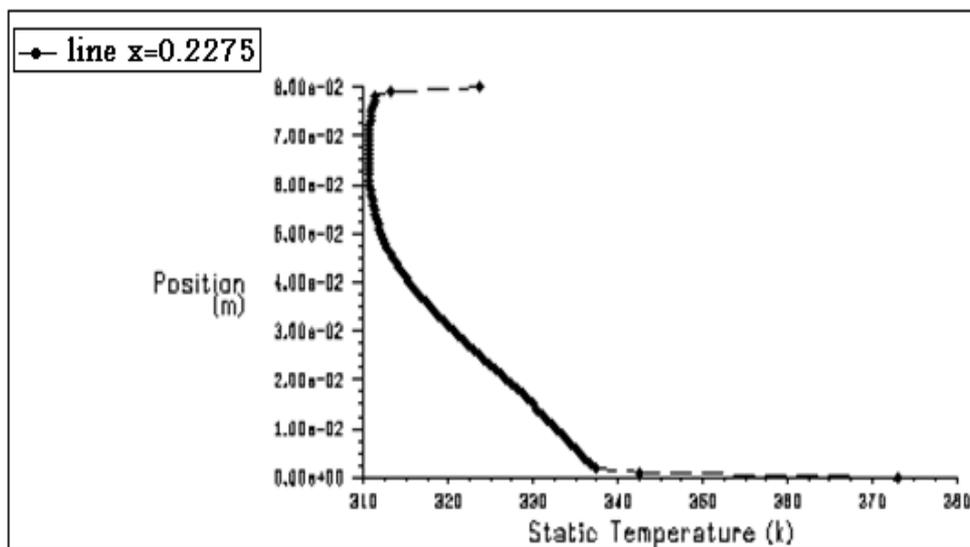
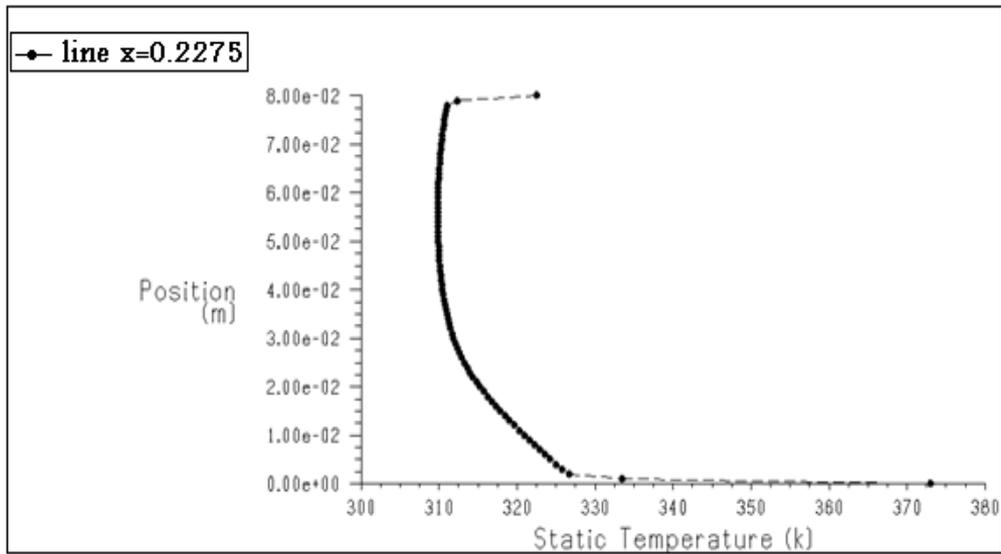


Figure IV.66 : Profils de la température à $x=0.2275\text{m}$, pour le Type N01.



Pour la position $X=0.0125\text{m}$ entre l'entrée et la première chicane (figures : IV.58, IV.59, IV.60 et IV.61), on remarque qu'il y a une augmentation considérable des températures dans les aspérités.

Les figures (IV.62, IV.63, IV.64 et IV.65) donnent les profils de température en position ($X=0.105$ et $x=0.135\text{m}$). On constate que les profils des températures sont semblables pour les quatre cas étudié. Ces graphes montrent aussi qu'il y a une augmentation considérable des températures comprise entre (0.205 m) et (0.24 m). Cette température atteint 373K pour le cas du type N03.

Pour la position $X=0.2275\text{m}$ en aval de la dernière chicane (figures : IV.66, IV.67, IV.68 et IV.69), on remarque que les profils des températures sont similaire, cette température atteint 328K.

IV.2.3 Etude de l'écoulement dans les capteurs solaires avec chicanes triangulaires :

Nous étudions dans cette partie un modèle de capteurs solaires plans à air avec chicanes triangulaires placées perpendiculairement à l'écoulement.

IV.2.3.1 Description de la géométrie :

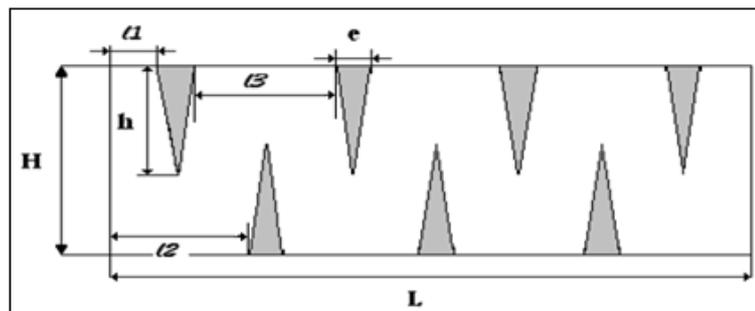


Figure IV.70-a: La géométrie étudiée.

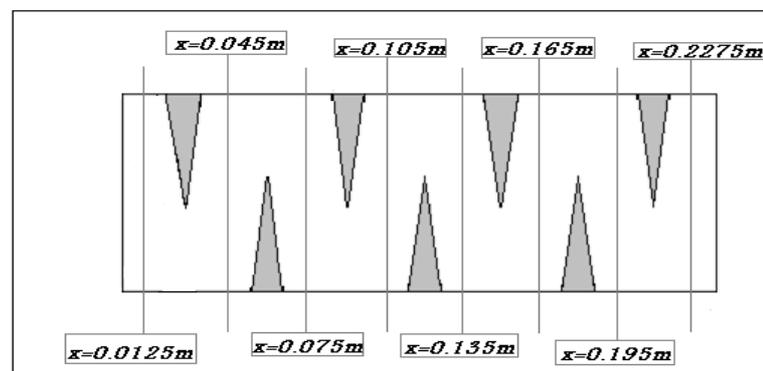


Figure IV.70-b: Les sections étudiées.

Les dimensions de ce type de capteur sont comme suit :

- La hauteur des chicanes : $h= 0.08 \text{ m}$
- L'espace entre l'entrée et la chicane supérieure : $l_1= 0.025 \text{ m}$

Chapitre IV : Résultats et Discussions.

- L'espace entre l'entrée et la première chicane inférieure : $\ell_2 = 0.055 \text{ m}$
- L'espace entre les deux chicanes : $\ell_3 = 0.05 \text{ m}$
- L'espace entre la chicane inférieure et la sortie : $\ell_1 = 0.025 \text{ m}$
- L'épaisseur des chicanes : $e_{chi} = 0.01 \text{ m}$

IV.2.3.2 Les conditions aux limites :

En résumé les conditions aux limites dans le tableau suivant :

Tableau IV.5 : « Les conditions aux limites des capteurs avec chicanes triangulaires ».

| Le capteur N1 : | | | | | | Le capteur N2 : | | | | | |
|-----------------|-------|-------|------|---------------------|----------------------|-----------------|-------|-------|------|---------------------|-----------------------|
| U_e | T_e | T_s | Ps | k | ε | U_e | T_e | T_s | Ps | k | ε |
| 0.093 | 279 | 309 | Patm | $4.3 \cdot 10^{-5}$ | $1.9 \cdot 10^{-10}$ | 0.069 | 279 | 309 | Patm | $2.3 \cdot 10^{-5}$ | $5.6 \cdot 10^{-11}$ |
| Le capteur N3 : | | | | | | Le capteur N4 : | | | | | |
| U_e | T_e | T_s | Ps | k | ε | U_e | T_e | T_s | Ps | k | ε |
| 0.021 | 279 | 309 | Patm | $2.2 \cdot 10^{-6}$ | $4.8 \cdot 10^{-13}$ | 0.035 | 279 | 309 | Patm | $3.4 \cdot 10^{-6}$ | $1.14 \cdot 10^{-12}$ |

- Le flux de la paroi supérieure :

$$Q = 440 \text{ W/m}^2$$

- La température de l'isolant et de la chicane inférieure :

$$T_{iso} = 373 \text{ K}$$

IV.2.3.3 Discussion :

IV.2.3.3.1 Champ de vitesse :

La figure IV.71 montre les contours ainsi que le champ de la grandeur de la vitesse autour des chicanes triangulaires.

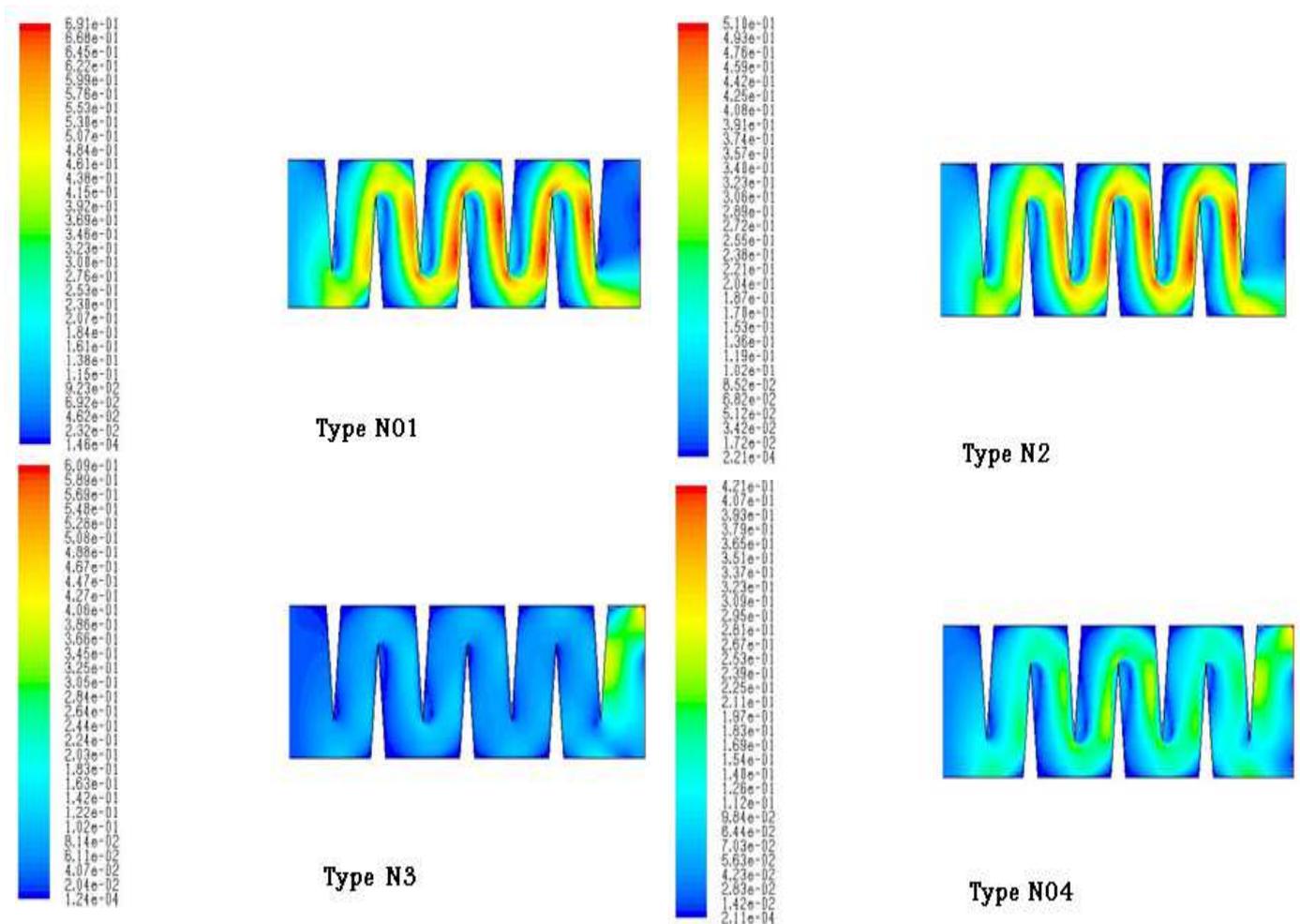


Figure IV.71 : le champ de Vitesse.

Nous pouvons remarquer une accélération de la vitesse entre l'espace paroi-chicanes, ceci est dû à la diminution de la section du passage du fluide. Là, il ya une conversion d'énergie du fluide provoquant un coefficient de frottement important. Puis en aval de l'obstacle, et selon le régime et le nombre de Reynolds, apparaisse un écoulement particulier entraînant à chaque fois un nouveau point de décollement du fluide avec évidence de changement de la zone de sillage, et ces aspérités seront remplies d'air à de très faibles vitesses.

Dans la zone d'écoulement d'air, la vitesse prend des valeurs importantes 0.68m/s pour le type N°01, 0.49m/s pour le type N°02, 0.4m/s pour le type N°03 et enfin 0.29m/s pour le type N04. Voir la figure IV.71.

IV.2.3.3.2 Profil de vitesse :

La variation de vitesse pour ce cas apparaît clairement sur les contours qui présentent des valeurs importantes. Pour bien étudier cette évolution de vitesse axiale dans le conduit de la veine fluide avec la formes de chicanes triangulaires, on trace les courbes de vitesse axiales pour ces positions axiales : $x=0.0125m$, $x=0.045m$, $x=0.075m$, $x=0.105m$, $x=0.135m$, $x=0.165m$, $x=0.195m$ et $x=0.2275m$.

Pour : $x=0.0125m$

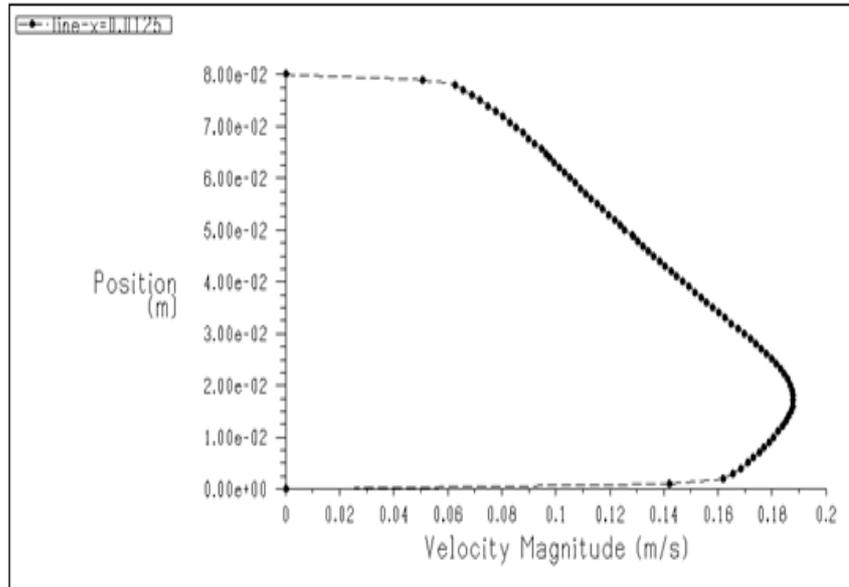


Figure IV.72 : Profils de la vitesse à $x=0.0125m$, pour le Type N01.

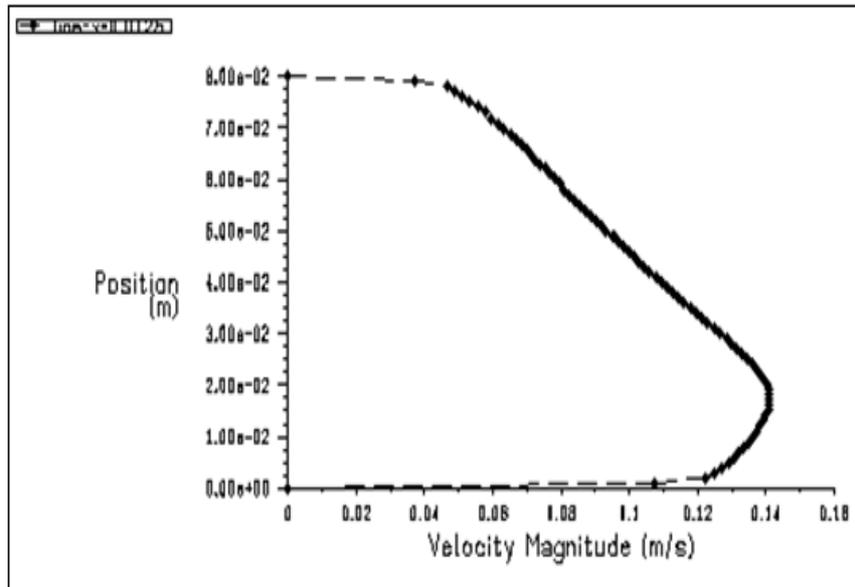


Figure IV.73 : Profils de la vitesse à $x=0.0125m$, pour le Type N02.

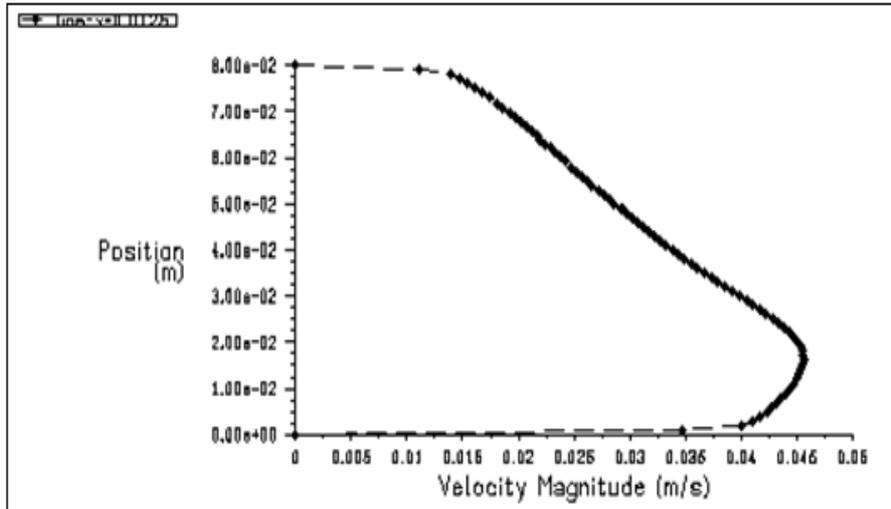


Figure IV.74 : Profils de la vitesse à $x=0.0125\text{m}$, pour le Type N03.

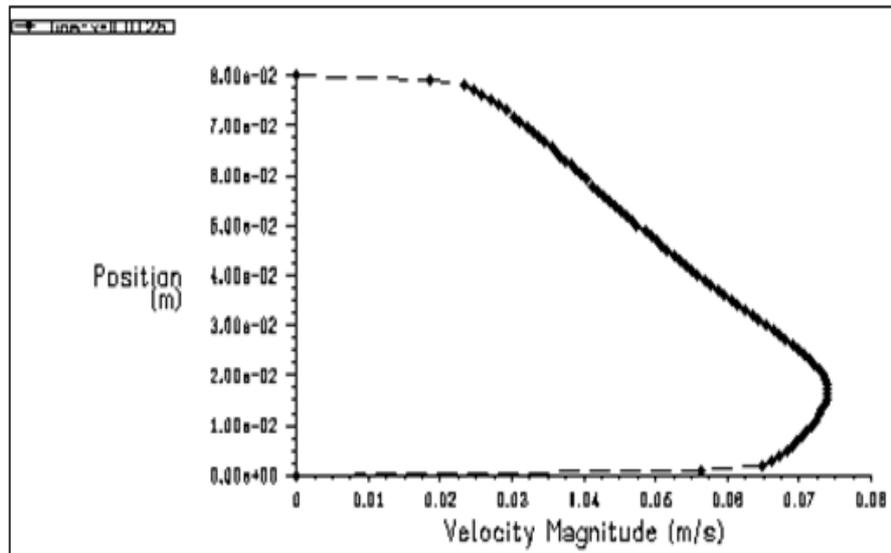


Figure IV.75 : Profils de la vitesse à $x=0.0125\text{m}$, pour le Type N04.

Pour : $x=0.105\text{m}$ et $x=0.135\text{m}$

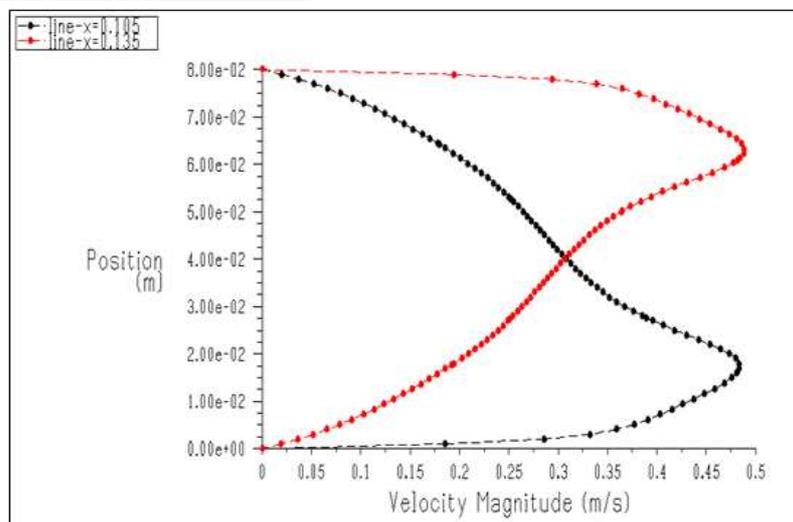


Figure IV.76 : Profils de la vitesse à $x=0.105\text{m}$ et $x=0.135\text{m}$, pour le Type N01.

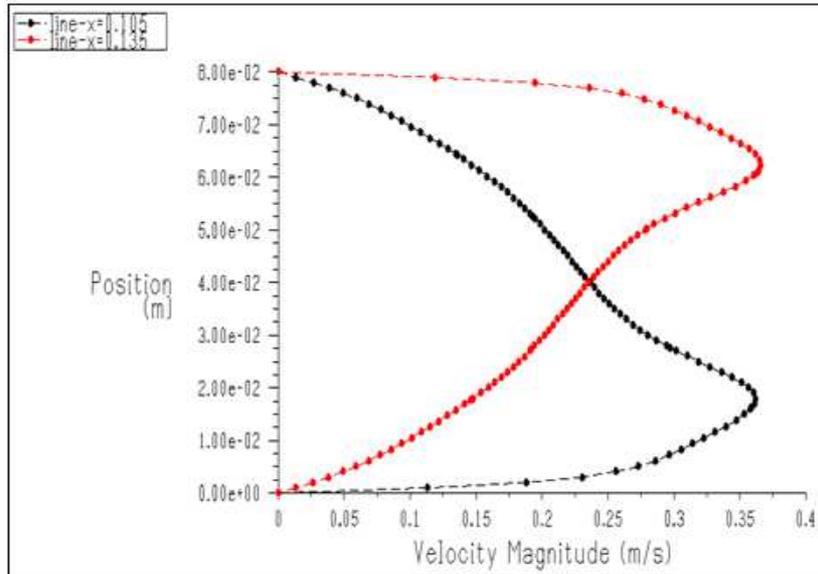


Figure IV.77 : Profils de la vitesse à $x=0.105m$ et $x=0.135m$, pour le Type N02.

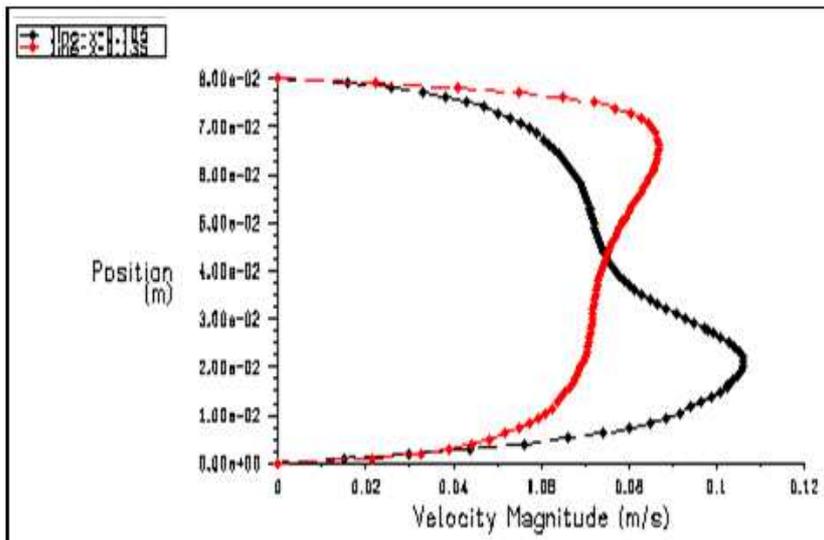


Figure IV.78 : Profils de la vitesse à $x=0.105m$ et $x=0.135m$, pour le Type N03.

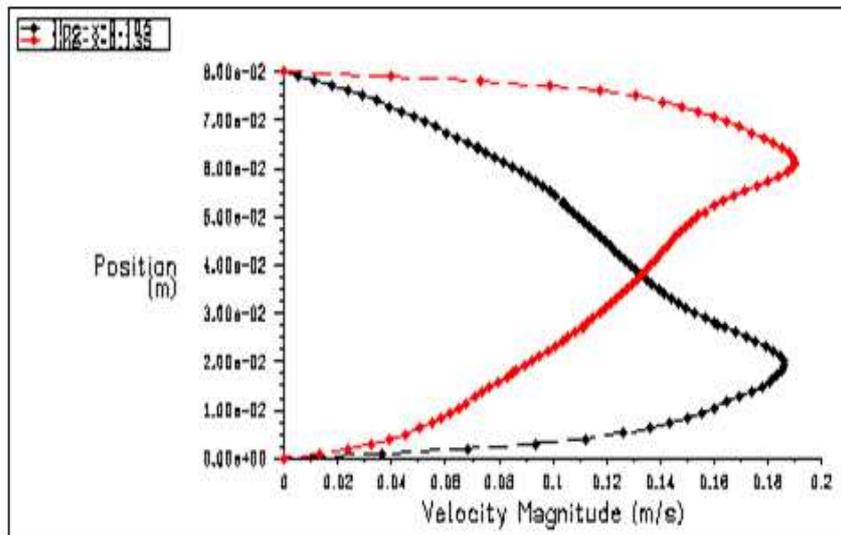


Figure IV.79 : Profils de la vitesse à $x=0.105m$ et $x=0.135m$, pour le Type N04.

Pour : $x=0.2275m$

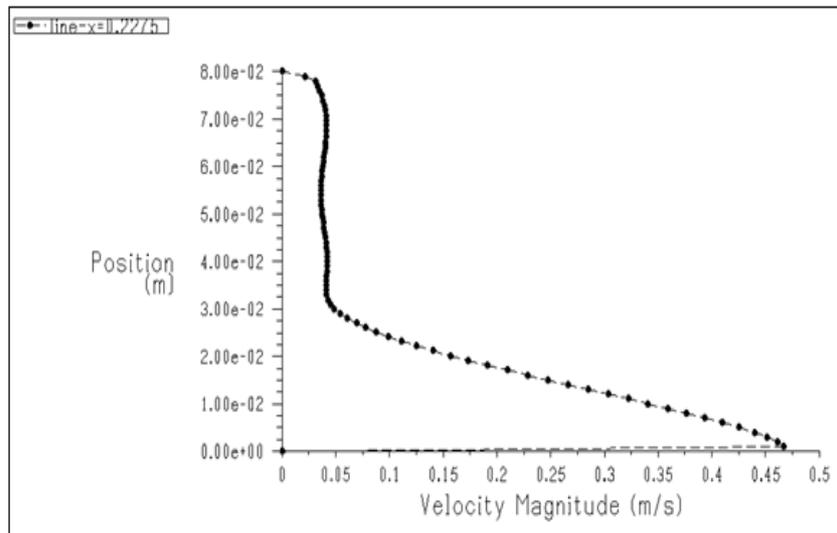


Figure IV.80 : Profils de la vitesse à $x=0.2275$, pour le Type N01.

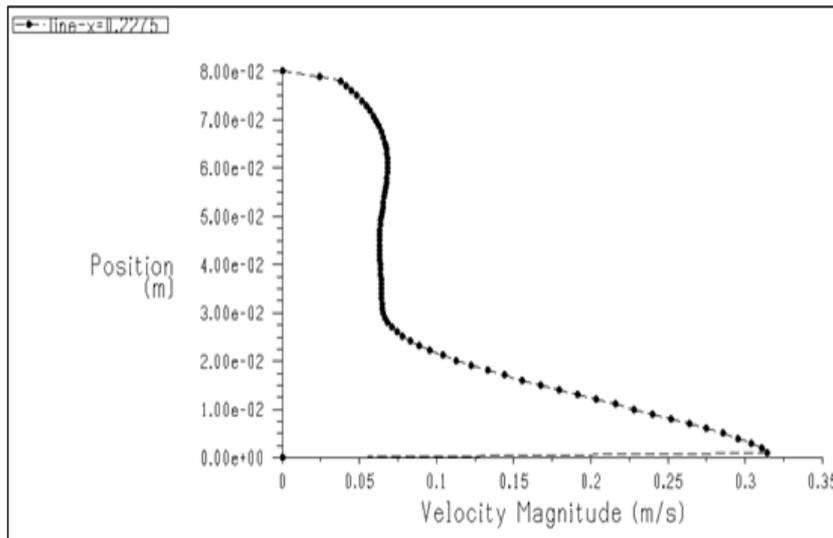


Figure IV.81: Profils de la vitesse à $x=0.2275$, pour le Type N02.

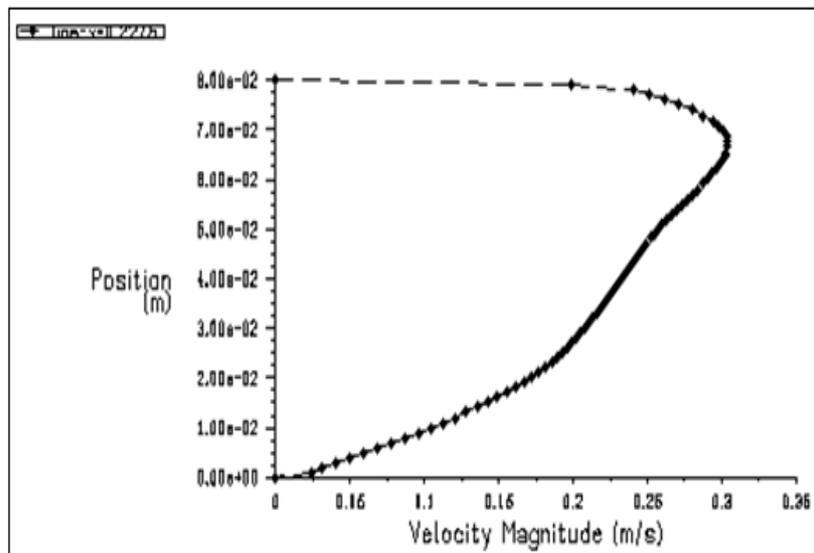


Figure IV.82 : Profils de la vitesse à $x=0.2275$, pour le Type N03.

Chapitre IV : Résultats et Discussions.

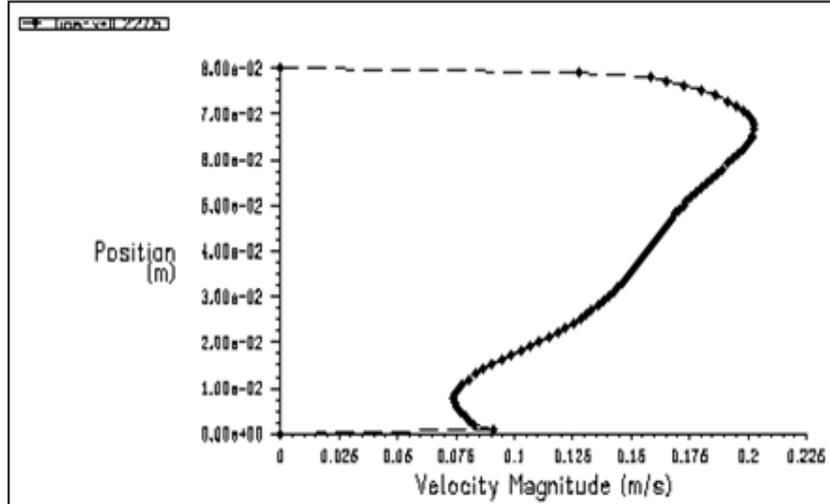


Figure IV.83 : Profils de la vitesse à $x=0.2275$, pour le Type N04.

Pour : $x=0.045m$, $x=0.075m$, $x=0.105m$, $x=0.135m$, $x=0.165m$, $x=0.195m$ et $x=0.2275m$

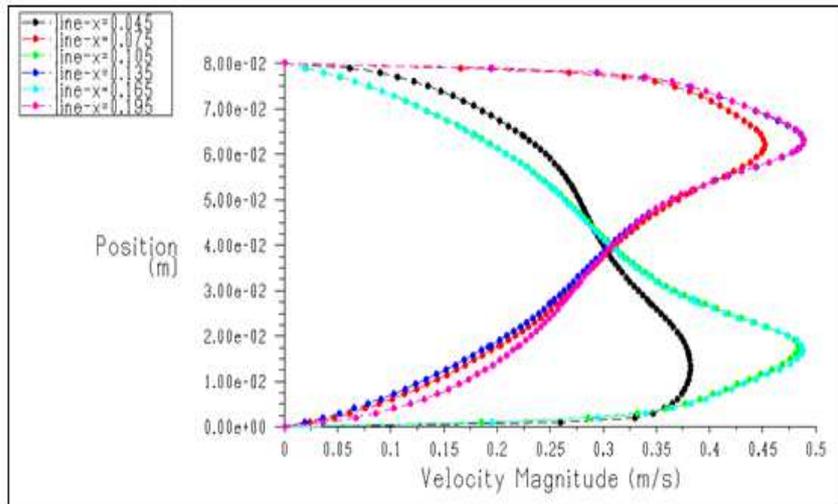


Figure IV.84 : Profils de la vitesse, pour le Type N01.

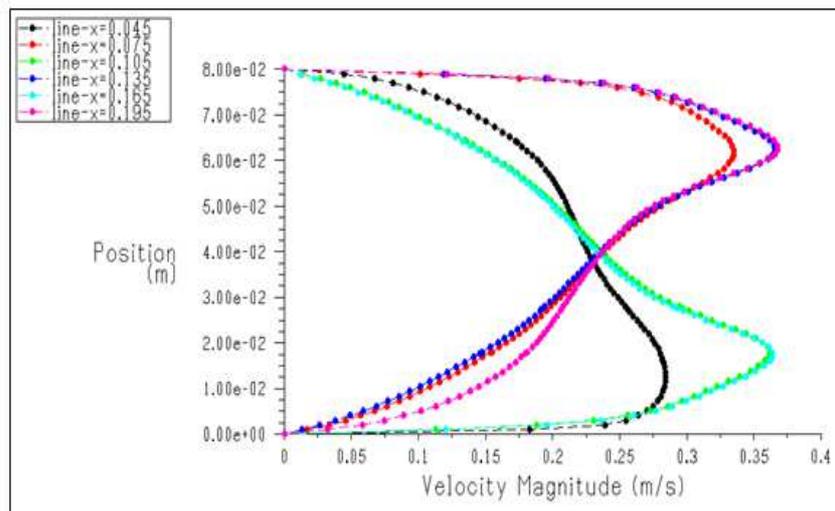


Figure IV.85 : Profils de la vitesse, pour le Type N02.

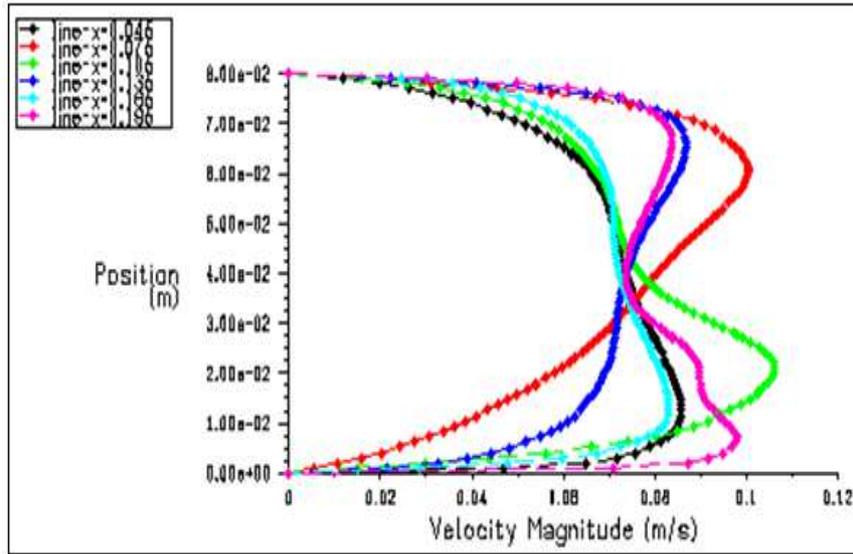


Figure IV.86 : Profils de la vitesse, pour le Type N03.

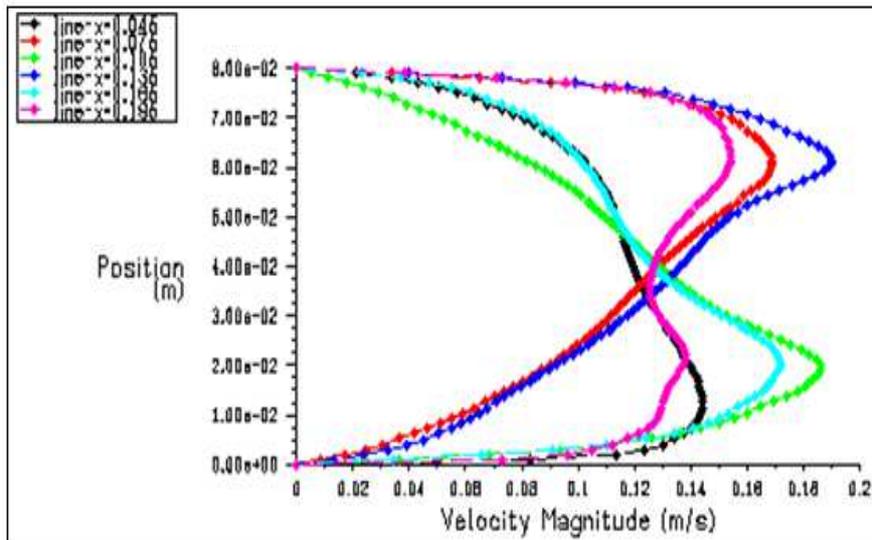


Figure IV.87 : Profils de la vitesse, pour le Type N04.

Les résultats numériques représentées par les profils de vitesse axiale en amont de la première chicane dans ce cas, pour les sections $x=0.0125m$, $x=0.045m$, $x=0.075m$, $x=0.105m$, $x=0.135m$, $x=0.165m$, $x=0.195m$ et $x=0.2275m$, sont indiquées dans les figures ci dessus.

La présence de la première chicane qui se trouve dans la paroi supérieure du canal induit une forte diminution de la vitesse, paradoxalement dans la paroi inférieure, là où on constate une augmentation de vitesse, surtout au voisinage du passage sous la chicane.

En amont et en aval du deuxième chicane inférieur ($x=0.125m$), l'écoulement est caractérisé par des vitesses très élevées dans la partie inférieure du capteur, qui approche 7 fois la vitesse d'entrée. Les résultats

montrent que la vitesse d'air, en se rapprochant de la deuxième chicane est réduite dans la partie inférieure du capteur, tandis que dans la partie supérieure elle augmente. Cette limitation dépend considérablement de la zone de recirculation en amont la deuxième chicane, caractérisée par des valeurs faibles.

L'écoulement en présence de chicanes de formes triangulaire s'accélère de plus en plus de gauche vers la droite en augmentant la taille de la zone de recirculation.

Les profils de vitesse axiale à la sortie du canal, pour $x=0.2275$ m, sont représentés sur les figures (IV.84, IV.85, IV.86 et IV.87). Les valeurs maximales de la vitesse axiale dans le cas du type N°01 atteints environ 0.438/s, soit 4.7 fois plus élevées que la vitesse d'entrée (0.093m/s). Ces valeurs sont engendrées en raison de la forte recirculation de l'écoulement dans la face arrière de la dernière chicane.

IV.2.3.3.3 Champ de Température :

La figure IV.88 présente les contours de température dans les quatre types du capteur. Elle montre une structure d'écoulement complexe où le fluide est dévié vers les parois supérieure et inférieure avec présence de zones de recirculation en amont et en aval de chaque chicane. Cette structure d'écoulement va influencer considérablement la répartition du champ de température et va permettre un meilleur brassage du fluide qui va stimuler le transfert de chaleur comme on le verra par la suite.

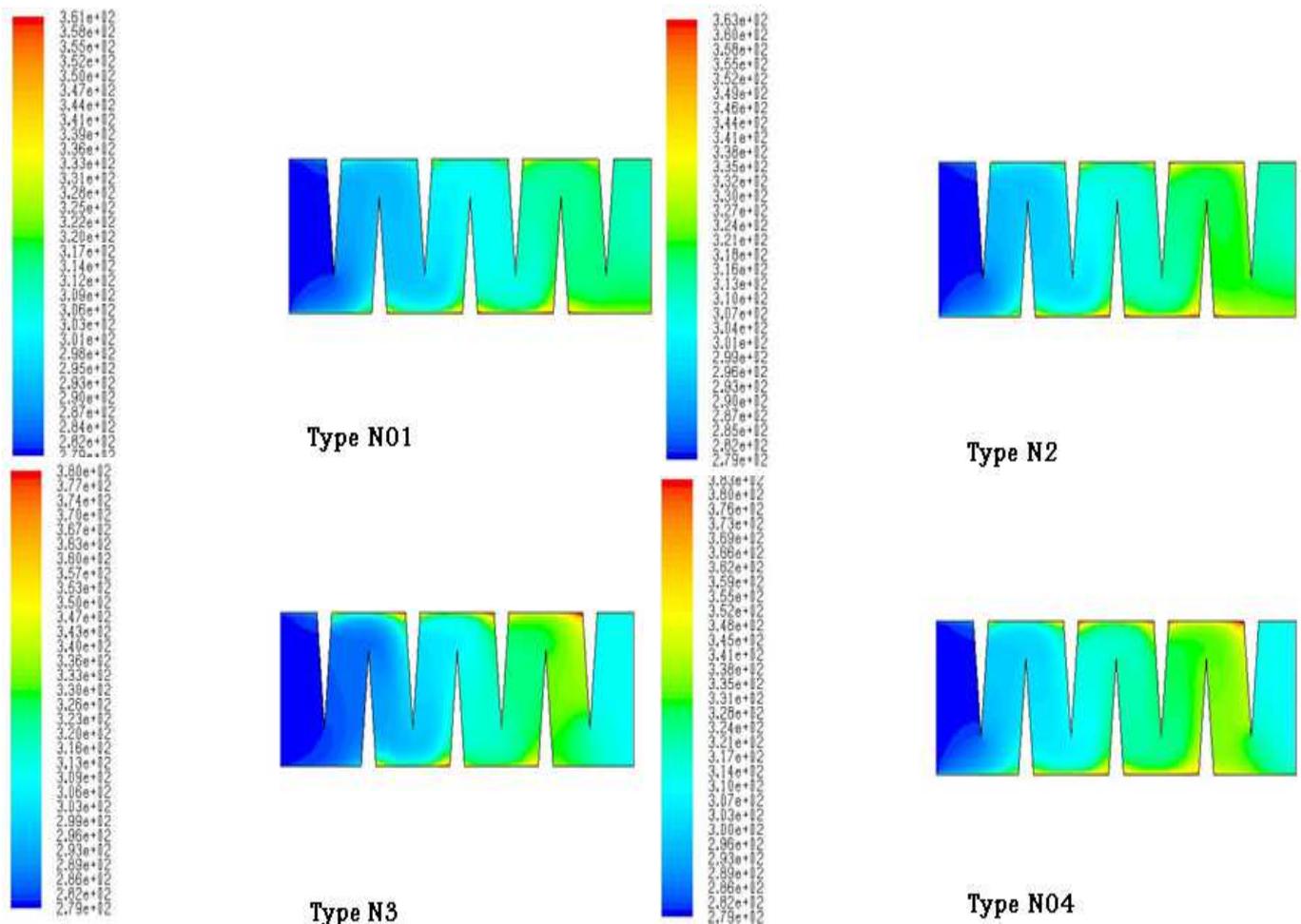


Figure IV.88 : le champ de Température.

Le champ de température pour ce cas est indiqué sur la figure IV.88, il montre une baisse de température dans les régions situées entre le bout de chaque chicane et les murs de canal.

Les zones les plus chaudes sont localisées au voisinage des parois et aux extrémités des chicanes.

On constate aussi que les valeurs de température totale sont sensiblement élevées au voisinage des chicanes surtout dans les régions situées en aval des chicanes inférieures.

La température de l'air augmente dès que le fluide se retrouve de nouveau en contact avec les chicanes, et ceci se répète d'une manière analogue d'une cellule à une autre.

IV.2.3.3.4 Profil de Température :

Les profils de températures sont donnés par les figures (IV.89, IV.90 à IV.104). On a tracé les profils de températures pour les positions axiales suivantes : $x=0.0125m$, $x=0.045m$, $x=0.075m$, $x=0.105m$, $x=0.135m$, $x=0.165m$, $x=0.195m$ et $x=0.2275m$.

Pour : $x=0.0125m$

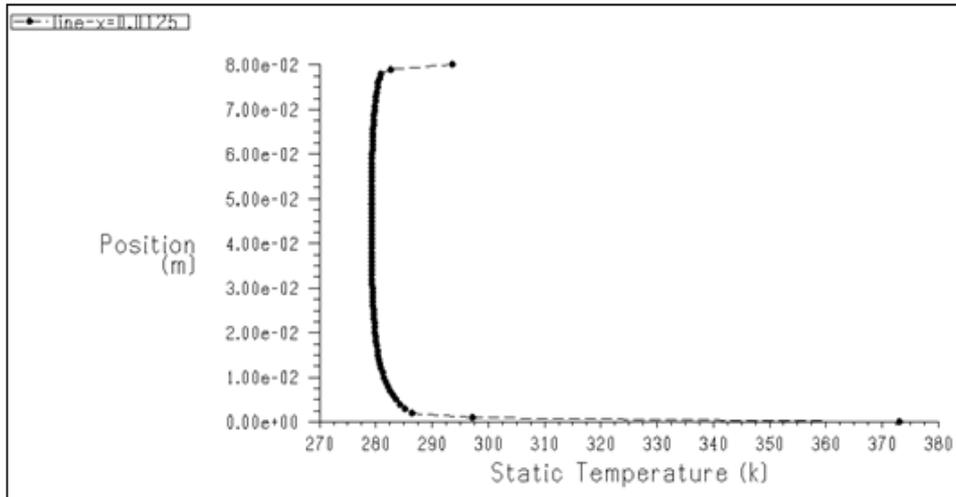


Figure IV.89 : Profils de la Température à $x=0.0125m$, pour le Type N01.

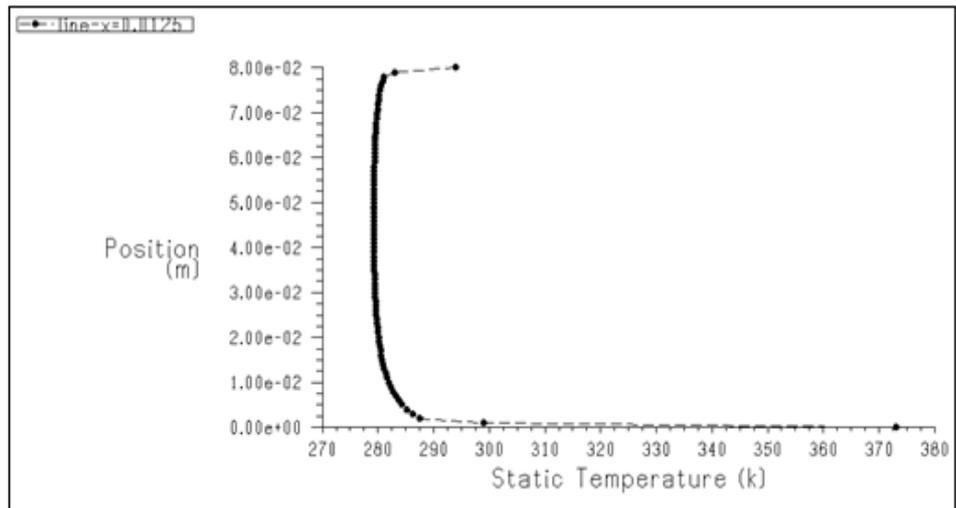


Figure IV.90 : Profils de la Température à $x=0.0125m$, pour le Type N02.

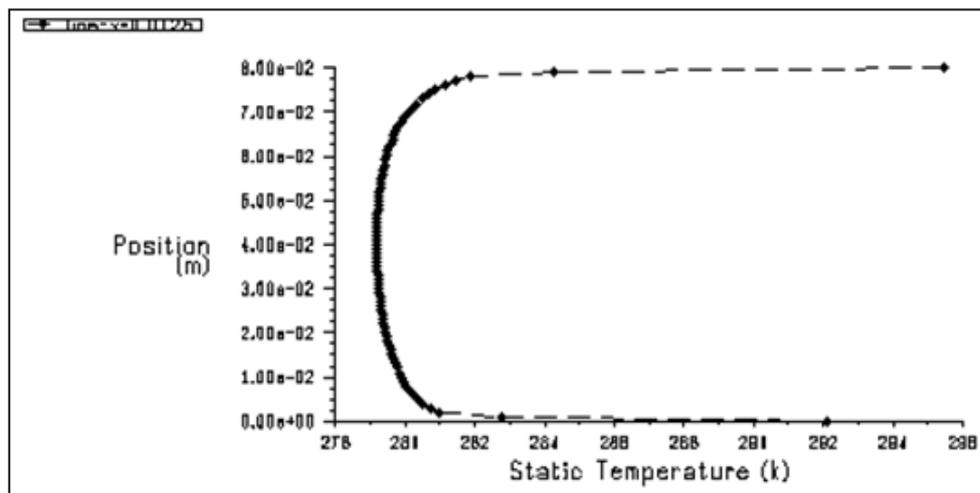


Figure IV.91 : Profils de la Température à $x=0.0125m$, pour le Type N03.

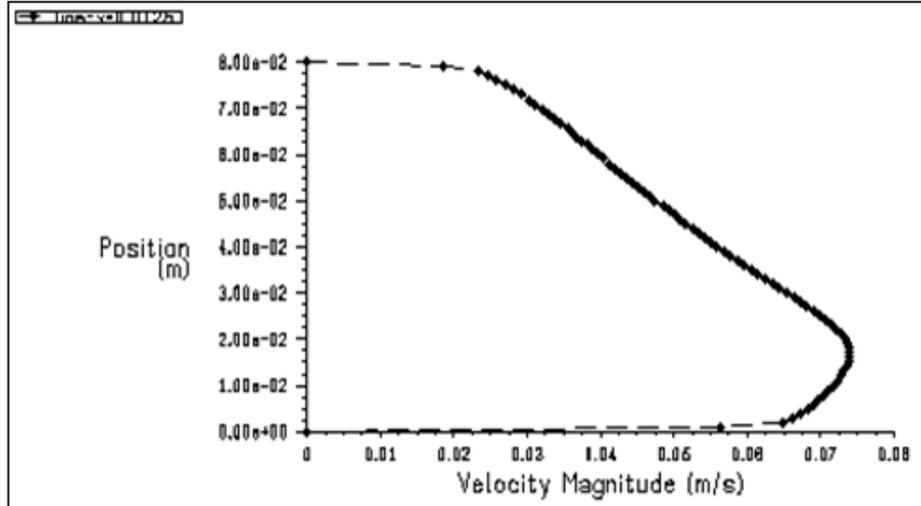


Figure IV.92 : Profils de la Température à $x=0.0125m$, pour le Type N04.

Pour : $x=0.105m$ et $x=0.135m$

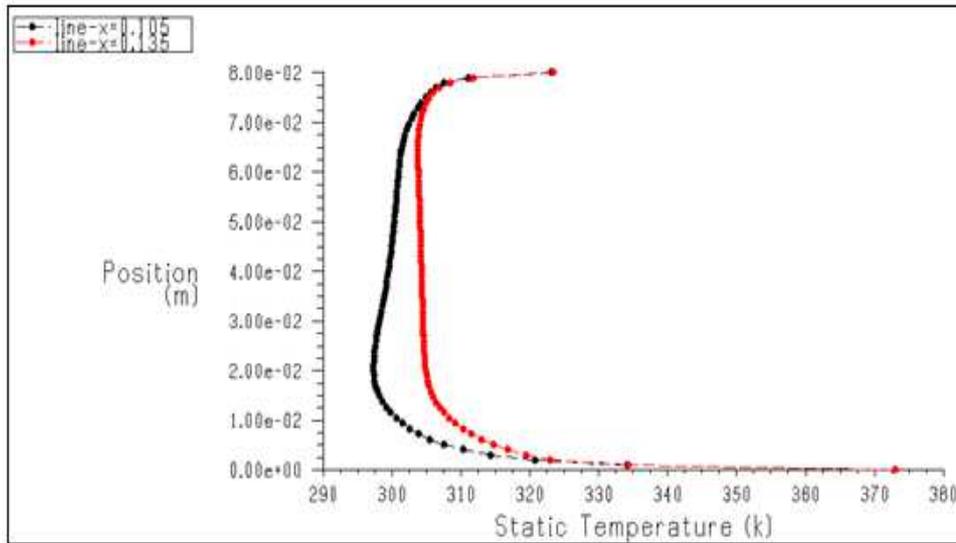


Figure IV.93 : Profils de la Température à $x=0.105m$ et $x=0.135m$, pour le Type N01.

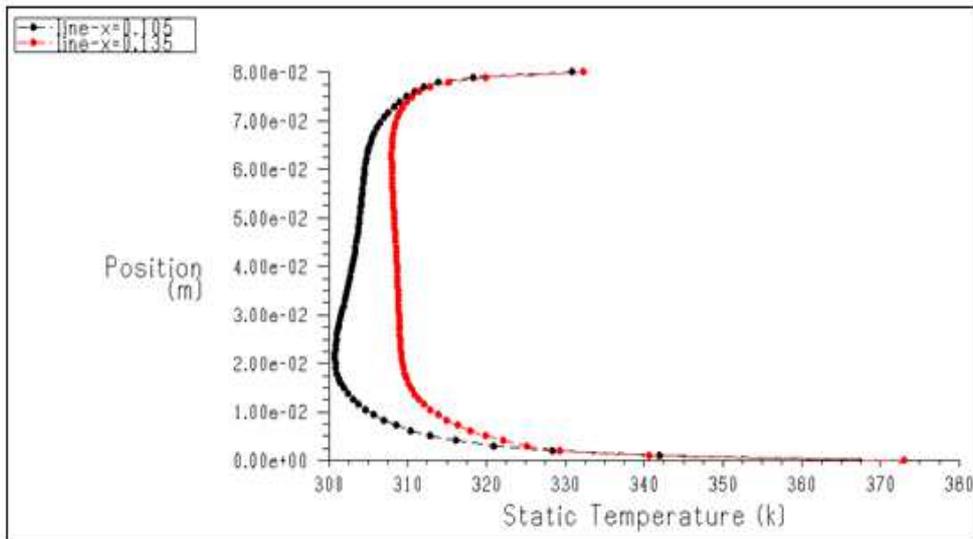


Figure IV.94 : Profils de la Température à $x=0.105m$ et $x=0.135m$, pour le Type N02.

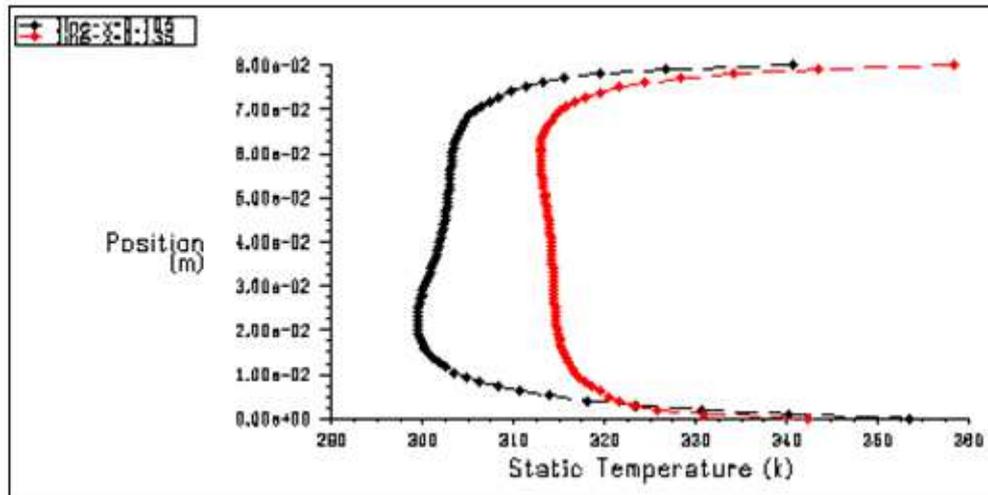


Figure IV.95 : Profils de la Température à $x=0.105\text{m}$ et $x=0.135\text{m}$, pour le Type N03.

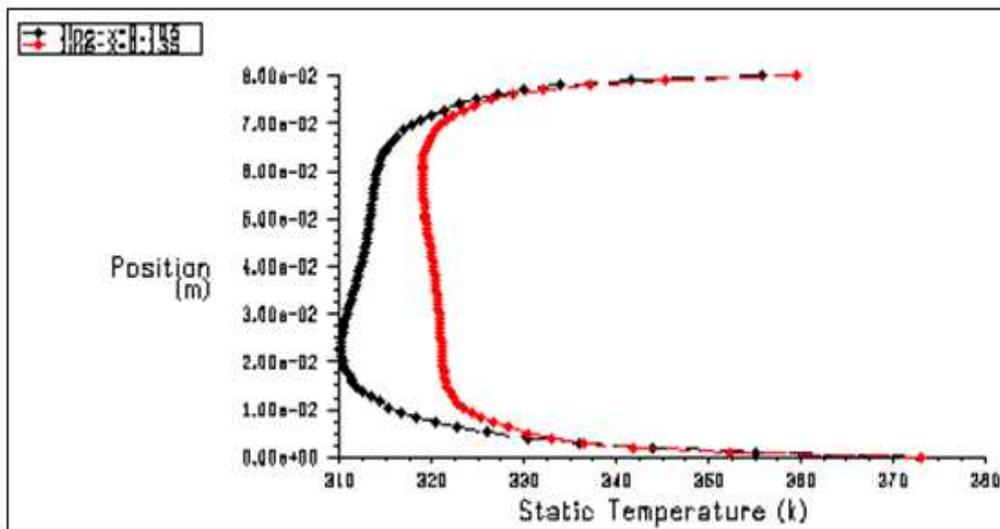


Figure IV.96 : Profils de la Température à $x=0.105\text{m}$ et $x=0.135\text{m}$, pour le Type N04.

Pour : $x=0.2275\text{m}$

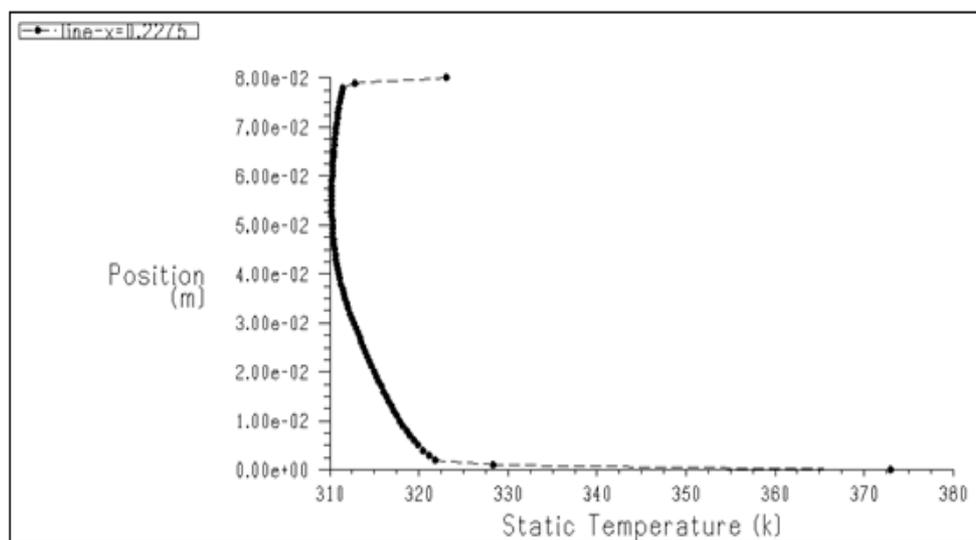


Figure IV.97 : Profils de la Température à $x=0.2275\text{m}$, pour le Type N01.

Chapitre IV : Résultats et Discussions.

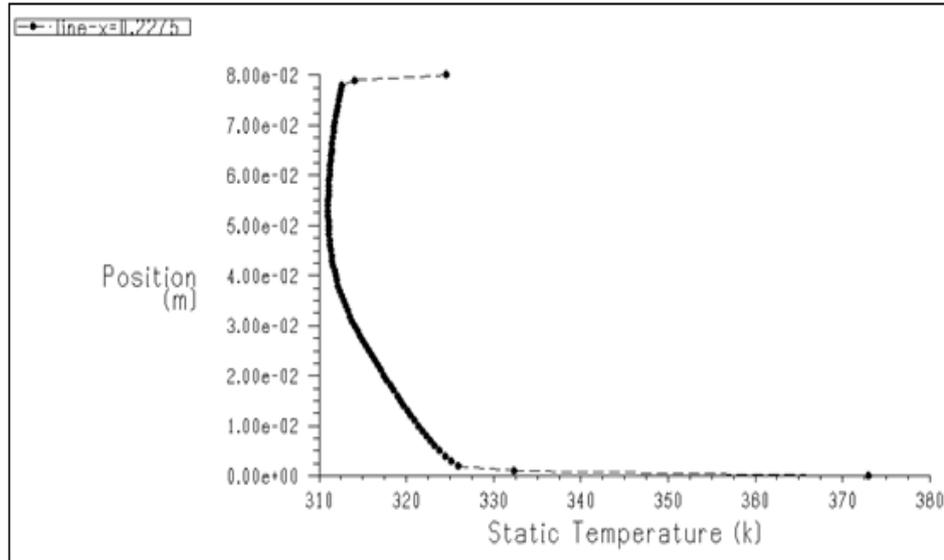


Figure IV.98: Profils de la Température à $x=0.2275$, pour le Type N02.

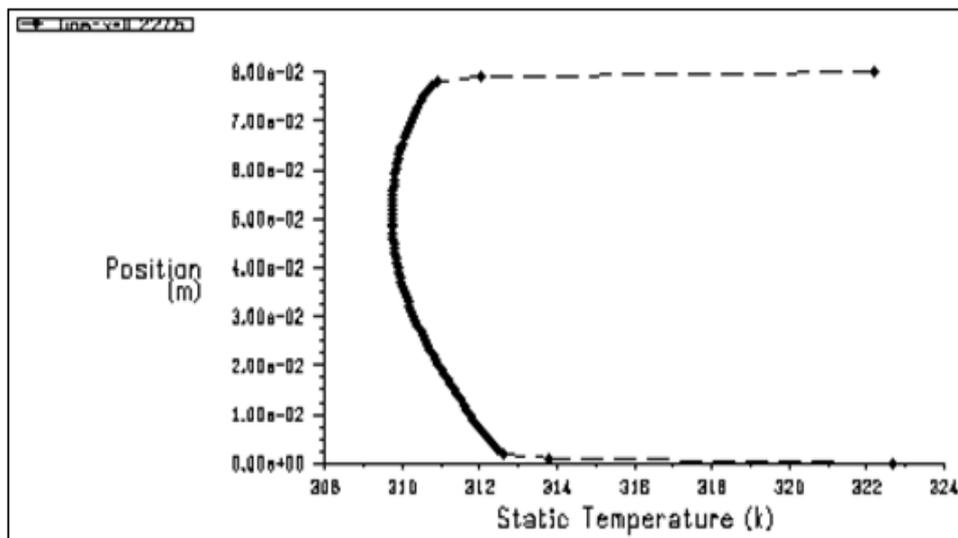


Figure IV.99 : Profils de la Température à $x=0.2275$, pour le Type N03.

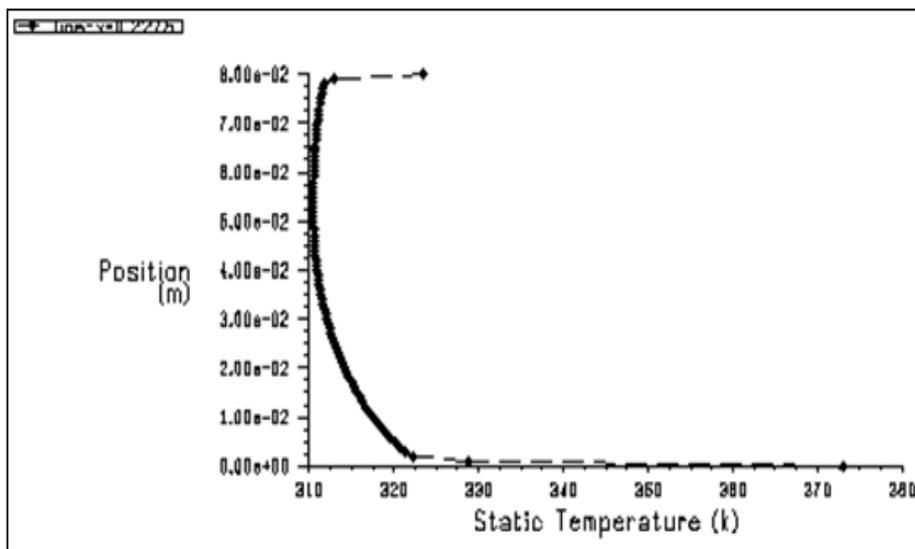


Figure IV.100: Profils de la Température à $x=0.2275$, pour le Type N04.

Chapitre IV : Résultats et Discussions.

Pour : $x=0.045m$, $x=0.075m$, $x=0.105m$, $x=0.135m$, $x=0.165m$, $x=0.195m$ et $x=0.2275m$

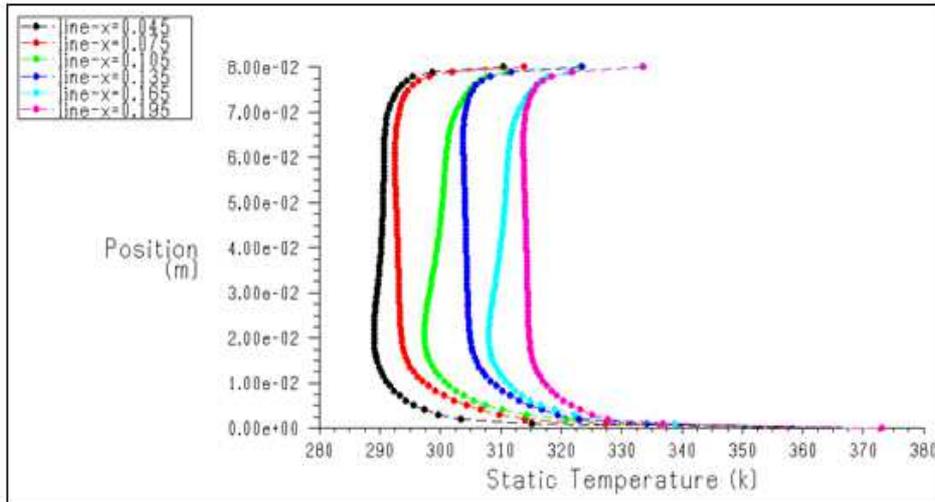


Figure IV.101 : Profils de la Température, pour le Type N01.

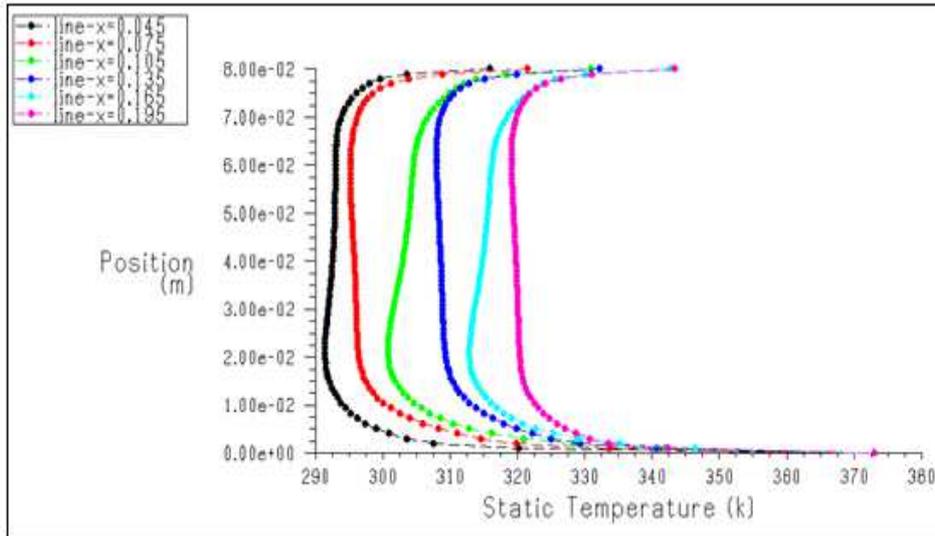


Figure IV.102 : Profils de la Température, pour le Type N02.

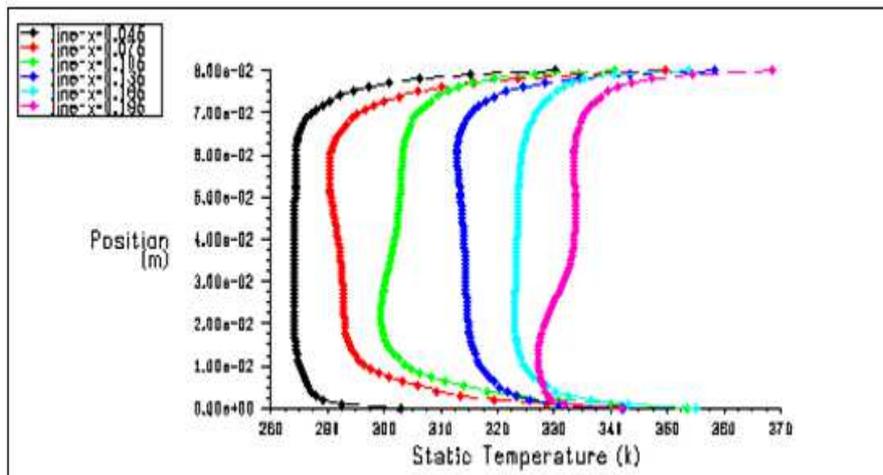


Figure IV.103 : Profils de la Température, pour le Type N03.

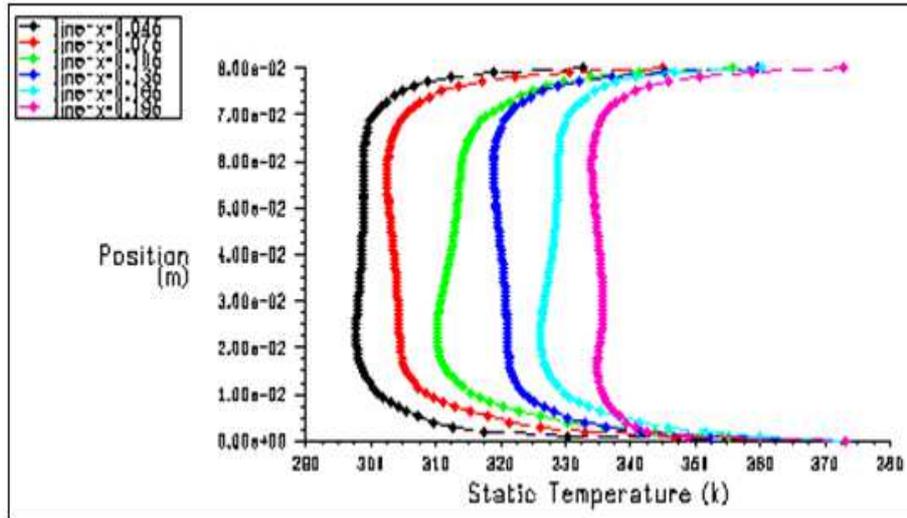


Figure IV.104 : Profils de la Température, pour le Type N04.

Les figures (IV.89, IV.90, IV.91 et IV.92), présente les profils de la température en amont de la première chicane, pour la section $x=0.0125$ m.

On observe que la présence des chicanes induit une forte augmentation de la température surtout dans les points morts en amont et en aval de la dernière chicane, paradoxalement dans le milieu intérieur d'écoulement d'air, on constate des valeurs sensiblement faibles à cause de la vitesse de l'écoulement et surtout au voisinage du passage sous l'ailette.

Les résultats montrent aussi que l'utilisation de l'une des deux formes de chicane triangulaire et rectangulaire n'influe pas sur le transfert thermique en amont de la première chicane.

Entre les chicanes, à des positions égal à $x=0.045$ m, $x=0.075$ m, $x=0.105$ m, $x=0.135$ m, $x=0.165$ m, $x=0.195$ m et $x=0.2275$ m, autrement dis à 0.032 m et 0.062 m (figures : IV.101, IV.102, IV.103 et IV.104), l'écoulement est caractérisé par des températures élevées au plus haute partie du capteur au voisinage de la chicane, tandis que dans la partie inférieure, on constate une baisse de température dans le segment libre situé entre le sommet de l'ailette et la paroi inférieure du capteur.

À la sortie du capteur, pour $x=0.2275$ m, on a présenté les profils de température sur les figures (IV.97, IV.98, IV.99 et IV.100). Les valeurs de la température diminuent de manière significative dans les deux régions haute et basse du capteur, à cause de la forte recirculation dans la face arrière de la seconde chicane qui, résulte du changement brusque du sens de l'écoulement.

Chapitre IV : Résultats et Discussions.

Les résultats numériques montrent aussi que l'utilisation des chicane triangulaire a conduit à une nette amélioration du transfert de chaleur dans le conduit du capteur.

On observe aussi que les sections les plus proches de l'ailette sont les mieux chauffées que les sections éloignées.

Ces remarques sont valables pour les deux types de chicanes, à ces deux sections, on constate aussi que les chicanes triangulaires assurent mieux l'augmentation de température de l'écoulement parce qu'elles contiennent la plus grandes zone de recirculation dans la région supérieure en aval des chicanes.



Conclusion
Générale

Conclusion générale

Nous avons abordé au cours de ce travail, en premier lieu, l'étude des champs dynamique et thermique dans un mur Trombe pour le stockage thermique de la chaleur, puis dans un deuxième lieu, la convection naturelle dans les capteurs solaires plans à air pour le cas de capteurs sans chicane et pour le cas des capteurs avec chicanes de formes différents (rectangulaires où triangulaires). Nous avons systématiquement procédé à des calculs numériques à l'aide d'un code de calcul « fluent ». Ce dernier est basé sur un schéma de discrétisation en volumes finis et des équations qui régissent les échanges convectifs et diffusifs.

La turbulence, dont l'effet est loin d'être négligeable, a été modélisée à l'aide du modèle $k - \varepsilon$.

D'après l'analyse des résultats numériques dans les deux cas traités du stockage de chaleur (mur Trombe adiabatique et mur Trombe avec flux de chaleur constant), on a constaté ce qui suit:

On remarque clairement, pour les deux cas que les valeurs de vitesse sont très faibles au voisinage de vitre et du mur (en béton), surtout dans les volumes morts et dans les régions situées au milieu de l'écoulement d'air, et puis augmente à la sortie ($v=0.155\text{m/s}$), en raison de rayonnement du vitrage.

On observe que les sections les plus proches de vitre sont les mieux chauffées que les sections éloignées.

D'après l'analyse des allures des graphes de la température totale et ceux de la vitesse axiale, on peut dire qu'il ya une proportionnalité inverse entre la vitesse axiale de l'air et sa température dans chaque section transversale.

Dans la deuxième partie de la simulation numérique sur les capteurs solaires plans à air, (sans chicane, avec chicane : rectangulaire et triangulaire), le but est de comparer leur rendement dans les mêmes conditions, afin de déterminer le capteur le plus performant. D'après les résultats on a constaté ce qui suit:

- **Une structure des capteurs sans chicanes**, l'utilisation de deux vitres a conduit à une nette amélioration du transfert de chaleur dans le conduit du canal du capteur.

D'après l'analyse des allures des graphes de la température totale et ceux de la vitesse axiale des deux cas pour la section du milieu des

Conclusion générale

différentes types des capteurs, on remarque que la température est liée à la vitesse, plus la vitesse augmente, plus la température diminue.

Autrement dit-il y a une proportionnalité inverse entre la vitesse axiale de l'air et sa température dans chaque section transversale.

- **Une structure des capteurs avec chicanes**, c'est une structure d'écoulement complexe assez désorganisée surtout près des parois du canal où le fluide est dévié vers les parois supérieure et inférieure avec des grandes vitesses.

Un vortex fort en aval de chaque chicane est observé. Cette perturbation est due à la séparation d'écoulement.

Loin de ces zones de recirculation, les lignes du courant deviennent parallèles ce qui se traduit par le développement progressif de l'écoulement.

Cette structure d'écoulement va influencer considérablement la répartition du champ de température et va permettre un meilleur brassage du fluide.

Le champ de température, montre aussi une baisse de température dans les zones situées entre le sommet de chaque chicane et les parois du canal. Tandis que les zones les plus chaudes sont pour la plupart, localisées au voisinage des parois et aux extrémités des chicanes.

On a constaté aussi, une proportionnalité inverse entre l'élévation de la vitesse axiale et la diminution de la température totale dans chaque section transversale du canal, cela signifie que le gradient de température au niveau des parois chauffées diminue avec l'augmentation de la vitesse d'écoulement.

Références Bibliographiques

- [1] Laouini S.E, Ben Houda B et Ouahrani m^{ed}.R, « Etude expérimentale et développement d'un bassin d'eau utilise comme capteur solaire », Rev. Sci. Fon. App, Vol. 2N°.1, 159-173. 2010.
- [2] Abene A. Dubois V. Ouagued A. Si-Youcef M, « Etude expérimentale de capteur solaire a air, le séchage de la figue », Technologies Avancées, Numéro 17. Janvier 2005.
- [3] Thomas LETZ et Xavier CHOLIN, « Intégrer le solaire thermique dans le bâtiment », Formation présentation de technologies solaires, INES Education, Janvier 2007-Décembre.
- [4] ABABSA Dalila, « Optimisation Du Rendement D'un Capteur Solaire Par Minimisation Des Pertes Convectives », Thèse de Magister en Physique option : Physique Energétique. Université El hadj lakhdar Batna. 2010.
- [5] KARROUTE Salima, « Etude théorique et numérique des systèmes couples : Distillateur plan-capteur et Distillateur Hot Box-Capteur », Thèse de Magister en Physique Spécialité : Physique Energétique Option : Photo thermique. Université Mentouri de Constantine, 2009.
- [6] Bourdin V, « Calculs astronomiques simplifiés », Master PAM 2^{ème} année, Energies renouvelables – Energie solaire thermique, Université Paris-Sud Orsay. 2013.
- [7] Fatmi Hakim, « Système hybride thermique photovoltaïque pour la production de l'eau distillée », Thèse de Magister en Physique Spécialité : Energétique Option : Photo thermique. Université Mentouri de Constantine, 2012.
- [8] Saadi Souad, «Effet des paramètres operationels sur les performances d'un capteur solaire plan », Mémoire de Magister en Physique Spécialité : Energies Renouvelables, Université Mentouri de Constantine, 2010.
- [11] Edwards D, K, Capteurs solaires, Edition SCM, Paris. 1979.
- [12] J, Bonal; P, Rossetti. Les énergies alternatives, Omniscience. 2007.
- [13] Y. Jannot, Thermique solaire, cours libre, 2003.
- [14] Dr khadraoui yahia, Cours de transferts thermiques, magister 2011.
- [15] Maha AHMAD, « Nouveaux composants actifs pour la gestion énergétique de l'enveloppe légère des bâtiments. Couplage matériaux a changement de phase super isolation, apports solaires. Thèse de doctorat en Mécanique Energétique, Université Joseph Fourier GRENOBLE 1, 2004.

Références Bibliographiques

- [16] BOURAS Abdelkarim, «Etude et conception d'un convertisseur solaire pour la production d'eau chaude sanitaire», Thèse de Magister en Physique Spécialité : Energétique Option : Photo Thermique. Université de Mentouri de Constantine, 2007.
- [17] Ahmed Ouameur Fouad, «Morphologie urbaine et confort thermique dans les espaces publics: Etude comparative entre trois tissus urbains de la ville de Québec ». Mémoire de Maître ès Sciences (M.Sc) Université Laval Québec. 2007.
- [18] Bassam Moujalled, Modélisation dynamique du confort thermique dans les bâtiments naturellement ventilés, Thèse de doctorat l'institut des sciences appliquées de Lyon. 2007.
- [19] V. CANDAS, Confort thermique, Techniques de l'Ingénieur, traité Génie énergétique. 2000.
- [20] AKCHICHE Zineb, «Etude de comportement d'une cheminée solaire en vue de l'isolation thermique ». Mémoire de Magister en Génie des Procédés Option : Energétique et Procédés. Université Kasdi Merbah Ouargla. 2011.
- [25] BOURHALEB Houssine. «Etude et expérimentation d'une chaîne énergétique solaire avec capteur à air, stockage thermique souterrain et récupération par pompe à chaleur», Thèse de doctorat 3^{ème} cycles en Energétique, Université HAINAVT Cambresis. 1987.
- [26] S.Youcef-Ali, «Study and optimization of the thermal performances of the offset rectangular plate fin absorber plates, with various glazing», Renewable Energy, 30 , pp. 271–280. 2005.
- [27] Donatien Njomo, «Étude thermique du comportement d'un capteur solaire plan à air à couverture combinée plastique-vitre», Revue Générale de Thermique. 37, pp. 973-980, 1998.
- [28] FERAHTA Fatima zohra, «Etude du transfert thermique dans la lame d'air d'un capteur solaire». Thèse en cotutelle de Doctorat en Physique Discipline : Mécanique et Energétique. Université Aix-Marseille, Université El Hadj Lakhdar Batna. 2012.
- [29] DGS, Solarthermische Anlagen, Berlin, 2001.
- [30] N. Moummi, J.Y. Desmons, S. Youcef-Ali, A. Moummi, «Energy analysis of a solar air collector with rows of fins», Renewable energy, ISSN 0960-1481, N° 13. pp, 2053-2064, 2004.

Références Bibliographiques

- [31] A. Abene, V. Dubois, M. Le Ray, A. Ouagued. «Study of a solar air flat plate collector: use of obstacles and application for the drying of grape». *Journal of Food Engineering*, 65, pp.15–22. 2004.
- [32] A. Ucar, M. Inall. «Thermal and exergy analysis of solar air collectors with passive augmentation techniques». *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 33, pp. 1281–1290. 2006.
- [33] Hikmet Esen. «Experimental energy and exergy analysis of a double-flow solar air heater having different obstacles on absorber plates». *Building and Environment*, 43, pp. 1046–1054. 2008.
- [34] Ho-Ming Yeh, Chii-Dong Ho. «Effect of external recycle on the performances of flat-plate solar air heaters with internal fins attached». *Renewable Energy*, 34, pp. 1340–1347. 2009.
- [35] K.R. Aharwala, B.K. Gandhib, J.S. Sainib. «Experimental investigation on heat-transfer enhancement due to a gap in an inclined continuous rib arrangement in a rectangular duct of solar air heater». *Renewable Energy*, 33 (2008), pp. 585–596.
- [36] M. N. Bargach, R. Tadili, A. S. Dahman, M. Boukallouch. «Comparison of the performance of two solar heating systems used to improve the microclimate of agricultural greenhouses in Morocco». *Renewable Energy*, 29, pp. 1073–1083. 2004.
- [37] C. D. Hoa, C. W. Yeha, S. M. Hsiehb. «Improvement in device performance of multi-pass flatplate solar air heaters with external recycle». *Renewable Energy*, 30, pp. 1601–1621. 2005.
- [38] M. Augustus Leon, S. Kumar. «Mathematical modeling and thermal performance analysis of unglazed transpired solar collectors». *Solar Energy*, 81, pp. 62–75. 2007.
- [39] Marwa M. Hassan, Yvan Beliveau. «Design, construction and performance prediction of integrated solar roof collectors using finite element analysis». *Construction and Building Materials*, 21, pp. 1069–1078. 2007.
- [40] N.T. Ahmad. «Agricultural solar air collector made from low cost plastic packing film ». *Renewable Energy*, 23, pp. 663–671. 2001.
- [41] Fayza Ben Yelles, Batoul Benabadji, Boumediène Benyoucef, Zakariya Ziani. «Comparaison entre un capteur a aérogel de silice et d'autres capteurs plans». 13^{èmes} Journées Internationales de Thermique Albi, France du 28 au 30 Août 2007.

Références Bibliographiques

- [42] A. Elanique, « Notes de Cours de Capteur Solaires Thermiques », Licence professionnelle ERDD, 2009-2010.
- [43] Cardonnel. C : Solaire actif et passif (Conception, bilan thermique, habitat), Les éditions parisiennes, CFP Chaud Froid Plomberie, s.l., , 239 p. 1983.
- [44] Sartori Ernani, « Convection coefficient equations for forced air flow over flat surfaces ». Solar Energy, 80, pp. 1063–1071, 2006.
- [45] Abedou Amar, « Contribution à l'étude de l'écoulement autour du corps d'Ahmed en utilisant un modèle DES », mémoire de magister en Energétique et développement durable option : Management de projets énergétique, Université M'hamed Bougara Boumerdès, 2012.
- [46] Guide utilisateur gambit.
- [47] Abdelouahab Benseddik, « Dimensionnements et simulation d'un prototype de cuiseur solaire pour les régions sahariennes », mémoire de l'ingénieur, Université de Abou Bekr Belkaid Tlemcen, soutenance en 01 juillet 2008.
- [48] KAMAL GUERAOUI, « Analyse numérique. Méthode des volumes finis », Master: Énergie et technologie des matériaux E.T.M, UNIVERSITÉ MOHAMMED V- AGDAL FACULTÉ DES SCIENCES Rabat, 2009-2010.
- [49] D. fedala. « Initiation à la CFD ». octobre 2007.
- [50] Catalin Grigoras, Theodor Matescu et Nelu-Cristian : « Analyse du comportement thermodynamique pour deux systèmes de chauffage solaire – murs échangeurs de chaleur », Université Technique « Gheorghe Asachi », Iași, Faculté de Génie Civil et Services des Bâtiments, Roumanie, 2011.

*** Les sites Internet :**

- [9] www.raee.org/docs/FORMATION_SOLAIRE.../RAEE_gisement.pdf
- [10] <http://devdurablemomo.blogspot.com/2010/03/les-avantages-et-les-inconvenients-de.html>
- [21] <http://www.cstb.fr/>
- [22] www.betcsharel.com/files/mur_trombe.doc
- [23] <http://www.eco-sud.com/wp-content/uploads/2011/04/Mur-trombe-mur-capteur.pdf>
- [24] http://www.climat.arch.ucl.ac.be/guide%20ISOLIN_avril2011_web.pdf