

Nomenclature

| | |
|------------------|---|
| A | Surface [m ²] |
| A _f | Surface des fenêtres [m ²] |
| A _a | Amplitude de la température de l'air [°C] |
| A _g | Surface totale de l'interstice [m ²] |
| A _s | Apport solaire [kw/moi] |
| A _v | Aire de ventilation totale [m ²] |
| B | Besoin thermique mensuel [kw/moi] |
| C | Capacité calorifique volumétrique [J/m ³ .k] |
| C _p | Chaleur spécifique de l'air [J/kg. °C] |
| C _a | Chaleur spécifique de l'air de la pièce [J/Kg.K] |
| C _{in} | Coefficient de surpuissance |
| C _v | Efficacité d'ouverture (=0.5-0.6 pour un vent perpendiculaire à l'ouverture, =0.25-0.35 pour un vent diagonal) |
| C _r | Ratio estimé des pertes calorifiques dues au réseau de tuyauteries |
| COP | Coefficient de performance |
| C ₁ | Coefficient d'orientation et d'inclinaison de la paroi considérée |
| D _j | Degrés Jours [Jours.°C] |
| DBP | Déperditions de base par transmission de chaleur [W/°C] |
| DBR | Déperditions de base par renouvellement d'air [W/°C] |
| D | Déperditions totales d'un logement [W/°C] |
| D _e | Durée d'ensoleillement pour chaque jour de moi [h] |
| D _i | Déperditions totales d'un volume [W/°C] |
| D _T | Déperditions par transmission du volume [W/°C] |
| D _R | Déperditions par renouvellement d'air du volume [W/°C] |
| D _s | Déperditions surfaciques à travers les parties courantes [W/°C] |
| D _{li} | Déperditions à travers les liaisons [W/°C] |
| D _{sol} | Déperditions à travers les parois en contact avec le sol [W/°C] |
| D _{inc} | Déperditions à travers les parois en contact avec les locaux non chauffés [W/°C] |
| D _{Rv} | Déperditions dues au fonctionnement normal des dispositifs de ventilation [W/°C] |
| D _{Rs} | Déperditions supplémentaires dues au vent [W/°C] |
| D _{réf} | Déperditions de référence [W/°C] |

| | |
|------------|---|
| D_s | Déperditions surfaciques par transmission à travers les parois [$W/°C$] |
| d | densité de l'air [kg / m^3] |
| d_0 | Profondeur de la pénétration de la sonde [m] |
| E_w | Energie finale pour un chauffage [kWh] |
| E_e | Consommation d'électricité [kWh/m^2an] |
| E | Puissance solaire incidente [W/m^2] |
| E_u | Puissance utile du capteur [W/m^2] |
| E_{occ} | Epaisseur de l'occultation. [m] |
| E_i | Epaisseur de la couche de matériau [m] |
| e | Facteur d'émission des murs intérieurs (généralement 0,95) |
| e_{vi} | Coefficient adimensionnel d'exposition |
| F_e | Facteur d'ensevelissement, qui traduit la réduction d'énergie solaire reçue par une paroi du fait de masque |
| F_{ts} | Facteur de transmission de la paroi considérée |
| fb | Facteur de réduction (ombrage et poussière) |
| fr | Surface du vitrage (sans cadre) [m^2] |
| fg | Taux d'utilisation de la chaleur [%] |
| fe | Facteur de réduction. |
| g | Taux global de transmission [%] |
| G | Coefficient de déperditions volumiques [$W/m^3 °C$] |
| G_{tj} | Flux de chaleur solaire radiative totale pour le mur ou plafond [W/m^2] |
| fb | Facteur de réduction (ombrage et poussière) |
| G_T | Rayonnement total sur la surface inclinée [W/m^2] |
| G_b | Rayonnement de faisceau sur la surface horizontale [W/m^2] |
| G_d | Rayonnement diffus sur la surface horizontale [W/m^2] |
| H | Coefficient de Convection : $5,73 kJ / h m^2 °C$ |
| h | distance entre l'entrée et la sortie [m] |
| h_i | Coefficients extérieur d'échange superficiel [$W/m^2°C$] |
| h_e, h_0 | Coefficients intérieur d'échange superficiel [$W/m^2°C$] |
| hp | Présence par jour [h/jour] |
| Hum.Rel | Humidité Relative [%] |
| IRDRH | Irradiation du rayonnement direct [W/m^2] |

| | |
|------------------|---|
| IRDFH | Irradiation du rayonnement diffus [W/m ²] |
| I | Irradiation global [kw/ m ²] |
| I _g | Radiation solaire globale pour une surface horizontale [W/m ²] |
| I _T | Radiation solaire pour les surfaces inclinées [W/m ²] |
| I _d | Radiation solaire diffuse pour une surface horizontale [W/m ²] |
| k _i | Facteur k de l'élément [W/m ² .K] |
| K | Coefficient d'échange global K des parois opaques (conductance) [W/m ² °C] |
| K _{vn} | Coefficient K du vitrage nu [W/m ² °C] |
| K _l | Coefficient de transmission linéique de la liaison [W/m. °C] |
| K _s | Coefficient de transmission linéique [W/m.°C] |
| L | Longueur intérieure de la liaison [m] |
| L _{tj} | Différence entre la longueur d'onde du rayonnement de l'environnement et la longueur d'onde du rayonnement émis pour le mur du bâtiment |
| Ma | Masse de l'air de la pièce [Kg] |
| m | Débit massique [kg/s] |
| N _j | Nombre de jour pour chaque moi |
| NJC | Nombre de jours chauffés [jours/an] |
| n | Nombre d'observations |
| N | Nombre de jours de chauffage |
| P | Nombre d'occupant |
| P _{Pi} | Perméabilité à l'air de la paroi [m ³ /h] |
| P _{ci} | Pouvoir calorifique inférieur de gaz [Wh/m ³] |
| Q | flux de chaleur [w/m ²] |
| Q _w | Besoins en chaleur [kWh] |
| Q _v | Somme des pertes en chaleur [kWh] |
| Q _h | Besoins pour le chauffage [kWh] |
| Q _{ww} | Besoin pour l'eau chaude [kwh] |
| Q _t | Besoins en chaleur par transmission [kWh] |
| Q _l | Besoins en chaleur par ventilation [kWh] |
| Q _g | Apports en chaleur [kWh] |
| Q _f | Chaleur interne et externe [kWh] |
| Q _{t i} | Pertes par élément 'toiture, paroi, fenêtre, plancher' [kWh] |
| Q _s | Apports par énergie solaire [kWh] |

| | |
|---------------|--|
| Q_p | Apports par les occupants [kWh] |
| Q_e | Apports par les équipements électriques [kWh] |
| q | Consommation totale de chaleur du bâtiment par jour [W] |
| $Q_{V_{réf}}$ | Débit extrait de référence [m^3/h] |
| $Q_{V_{max}}$ | Débit extrait maximal de référence [m^3/h] |
| $Q_{V_{min}}$ | Débit extrait minimal de référence. [m^3/h] |
| | Débit spécifique de ventilation [m^3/h] |
| Q_s | Débit spécifique supplémentaire par infiltration dues au vent. [m^3/h] |
| RH | Rayonnement global par jour de chauffage [W/m^2] |
| r_b | Rayon du forage [m] |
| R_b | Résistance thermique [$K.m/W$] |
| R | Résistance thermique ; cas général [$m^2°C/ W$] |
| r_v | Résistance supplémentaire des voilages éventuels [$m^2°C/ W$] |
| r_{rid} | Résistance supplémentaire des rideaux éventuels [$m^2°C/ W$] |
| r_{occ} | Résistance supplémentaire des occultations [$m^2°C/ W$] |
| S | Surface de la grille de ventilation [m^2] |
| S_h | Surface habitable [m^2] |
| S_{se} | Surface sud équivalente [m^2] |
| T_s | Température de sortie d'air [$°C$] |
| T_e | Température d'entrée d'air [$°C$] |
| T_f | Température de la surface intérieure de la paroi Trombe [$°C$] |
| T_{ref} | Température moyenne des parois (surface des murs à l'intérieur) [$°C$] |
| T air | Température de l'air [$°C$] |
| T_c | La température de confort [$°C$] |
| T_m | Température extérieure moyenne [$°C$] |
| T_{emax} | Température maximale journalière [$°C$] |
| T_{emin} | Température minimale journalière [$°C$] |
| T_a | Température ambiante [$°C$] |
| TCH | Taux de chauffage [$K \times \text{jour/an}$] |
| $T_{sol j}$ | Température sol-air e pour le jème mur ou plafond [$°C$] |
| T_0 | Température extérieure [$°C$] |
| $T(t,z)$ | Température du sol à une profondeur h de la surface [$°C$] |

| | |
|----------------------|---|
| t | Temps sur une année [s] |
| t ₀ | Période de variation de la température [s] |
| T _i | Température intérieure de confort [°C] |
| T _n | Température de l'espace non chauffé. [°C] |
| T _e | Température extérieure de base [°C] |
| t | Temps Hivernal [h] |
| U | Le coefficient de transmission thermique [W/m ² . °C] ou [W/m ² .K] |
| V | Vitesse d'écoulement d'air (m / s) |
| Vit. _{vent} | Vitesse du Vent [m/s] |
| V _h | Volume habitable [m ³] |
| V _a | Volume de l'air de la pièce [m ³] |
| v | Vitesse d'entrée de l'air de la PAC [m/s] |
| W | Travail [W] |

Lettres grègues :

- Coefficient d'absorption pour le rayonnement solaire
- 1** Coefficient d'absorptivité de la surface
- Angle d'inclinaison de la surface [rad]
- Nombre d'Euler [0.5772]
- Coefficient d'émissivité pour le rayonnement thermique
- Rendement
- Angle d'incidence, l'angle entre le rayonnement du faisceau sur la surface et la normale à la surface [rad]
- z** Angle du zénith, l'angle entre la verticale et la ligne avec le soleil
- Conductivité thermique utile de chaque matériau [W/m. °C]
- i** Conductivité thermique du matériau [W/m.°C]
- occ** Conductivité thermique du matériau constituant l'occultation. [W/m.°C]
- g** Réflectivité diffuse de la terre [%]
- a** Densité de l'air [Kg m⁻³]
- Masse volumique de l'air [kg/m³]
- Stefan - Boltzmann constant [20, 41 x 10⁶ KJ / h m² k⁴]
- Coefficient de réduction de température -
- Fréquence angulaire égale à 0.0172 rad/jour
- T** différence de température entre l'intérieur et l'extérieur [°c]

Liste des figures

Chapitre 1 :

| | |
|--|----|
| Figure 1.1 : La longueur d'onde de rayonnement solaire | 6 |
| Figure 1.2 : ressources thermiques..... | 7 |
| Figure 1.3 : Énergie éolienne..... | 10 |
| Figure 1.4 : Énergie hydraulique..... | 11 |
| Figure 1.5 : Énergie géothermique..... | 12 |
| Figure 1.6 : Énergie solaire..... | 13 |
| Figure 1.7 : Énergie Biomasse..... | 13 |
| Figure 1.8 : Séchoir solaire indirect destiné au séchage des PAM, réalisé au CDER..... | 17 |
| Figure 1.9 : Chauffage à eau | 17 |
| Figure 1.10 : Schéma de principe des principales filières solaires à concentration..... | 21 |
| Figure 1.11 : Exemples de configurations de champ d'héliostat pour les concentrateurs à tour..... | 24 |
| Figure 1.12 : Exemple de courbes de performances d'un récepteur solaire central champ solaire 75 000 m ² , ensoleillement 950 W.m ⁻² , température de fluide 500 °C, coefficient d'échange à la paroi 800 W.m ⁻² .K | 35 |
| Figure 1.13 : Montage d'un élément de récepteur tubulaire sur un capteur cylindro-parabolique..... | 27 |
| Figure 1.14 : Concentrateur linéaire à miroirs de Fresnel..... | 28 |

Chapitre 2 :

| | |
|--|----|
| Figure 2.1 : Mur Trombe du parc national Zion, Utah Etats Unis, étudié par Torcellini et Pless (2004)..... | 30 |
| Figure 2.2 : Illustration du SolarWall | 32 |

| | |
|--|----|
| Figure 2.3 : Cheminée solaire du lycée français de Damas, en Syrie par Yves Lion..... | 33 |
| Figure 2.4 : Exemple des maisons du quartier Arrousets à Bayonne qui intègrent un bardage pin maritime ventilé devant une isolation par l'extérieur..... | 36 |
| Figure 2.5 : Illustration d'une façade double peau : le bâtiment de l'Office 64 à Bayonne. Architecte P. Arotcharen..... | 38 |
| Figure 2.6 : Bâtiment Consorcio à Santiago au Chili avec une façade végétalisée, de L'architecte Enrique Brown. Vue extérieure et intérieure pour les saisons été et hiver..... | 38 |
| FIGURE 2.7 : maison Félix Trombe à Odeillo (Pyrénées-Orientales) 1962..... | 41 |
| Figure 2.8 : le principe des murs capteurs accumulateurs..... | 42 |
| Figure 2.9 : La spécificité du mur Trombe..... | 43 |
| Figure 2.10 : Coefficients d'absorption pour différents matériaux et différentes couleurs. | 44 |
| Figure 2.11 : Opération du mur Trombe..... | 46 |
| Figure 2.12 : Fonctionnement d'un mur thermique en hiver | 47 |
| Figure 2.13 : Fonctionnement d'un mur thermique pendant l'été..... | 48 |
| Figure 2.14 : Schéma électrique du mur..... | 52 |
| Figure 2.15 : Evolution de la température interne du local avec deux méthodes pour l'évaluation du flux échangé par thermo circulation..... | 52 |
| Figure 2.16 : Influence de la thermo circulation sur la température interne du local..... | 53 |
| Figure 2.17 : Evolution de la température du local en hiver..... | 53 |
| Figure 2.18 : Evolution de température la du local en été..... | 54 |
| Figure 2.19 : Plan descriptif des pièces étudiées..... | 55 |
| Figure 2.20 : Eclairages estimés pour différentes orientations. Ghardaïa 02 06 2008... | 56 |
| Figure 2.21 : Eclairages estimés pour une surface horizontale. Ghardaïa 08 01 2008... | 56 |
| Figure 2.22 : Eclairages estimés pour une surface horizontale. Ghardaïa 02 juin 2008... | 57 |
| Figure 2.23 : Température ambiante Ghardaïa le 08 – 09 et le 10 janvier 2008..... | 57 |
| Figure 2.24 : Température de l'air intérieur de la pièce sans mur Trombe. Ghardaïa 08 jan 2008. | 59 |

| | |
|--|----|
| Figure 2. 25 : Température du mur nord de la pièce sans mur Trombe. Ghardaïa 08 01 08. | 59 |
| Figure 2. 26 : Température de l'air intérieur de la pièce et de la salle de séjour sans mur Trombe. Ghardaïa 08-09 et le 10 janvier 2008..... | 60 |
| Figure 2. 27 : Température de l'air intérieur de la pièce avec et sans mur Trombe. Ghardaïa 08-09 et le 10 janvier 2008..... | 60 |
| Figure 2. 28 : Température du mur sud de la pièce avec et sans mur Trombe. Ghardaïa 08- et le 10 janvier 2008..... | 61 |
| Figure 2. 29 : Température de l'air intérieur de la salle de séjour avec et sans mur Trombe. Ghardaïa 08-09 et le 10 janvier 2008..... | 61 |
| Figure 2. 30 : Température de l'air intérieur de la pièce et de la salle de séjour avec en présence du mur Trombe. Ghardaïa 08-09 et le 10 janvier 2008..... | 62 |
| Figure 2.31 : Schéma du phénomène de multi-réflexion du rayonnement CLO..... | 65 |
| Figure 2.32 : Illustration du profil d'écoulement vertical et de la vitesse moyenne dans une cavité chauffée..... | 65 |
| Figure 2.33 : Schéma de la paroi de stockage thermique..... | 70 |
| Figure 2.34 : (a) Schéma d'une paroi de stockage thermique. | 74 |
| (B) circuit électrique équivalent pour le flux de chaleur à travers la paroi..... | 74 |
| Chapitre 3 : | |
| Figure 3.1 : Situation Géographique Région Tlemcen | 79 |
| Figure 3.2 : localisation de la ville Tlemcen | 80 |
| Figure 3.3 : vue du ciel de plateau Lella Setti | 81 |
| Figure 3.4 : COURBE DE TEMPÉRATURE TLEMCEN..... | 82 |
| Figure 3.5 : Types de murs utilisés généralement | 84 |
| Figures 3.6 : Isolant traditionnels : laine de roche, laine de verre, verre cellulaire, perlite expansée..... | 87 |
| Figure 3. 7: De gauche à droite : mousse de polyuréthane, mousse de polystyrène expansé, mousse de polystyrène extrudé, laine de roche, laine de verre, mousse résol | 88 |
| Figure 3. 8: Composants Mur Trombe..... | 89 |
| Figure 3.9 : Lancement du Gambit | 90 |

| | |
|--|-----|
| Figure 3.10 : Construction de la géométrie..... | 91 |
| Figure 3. 11 : Maillage structuré et non structuré | 92 |
| Figure 3.12 : Définition des frontières..... | 93 |
| Figure 3. 13: Exportation du maillage | 93 |
| Figure 3. 14 : Importation de la géométrie | 94 |
| Figure 3. 15 : Vérification du maillage | 94 |
| Figure 3. 16: Vérification des unités..... | 95 |
| Figure 3. 17: Choix du solveur | 95 |
| Figure 3. 18 : Equation de l'énergie..... | 96 |
| Figure 3. 19 : Choix du modèle d'écoulement | 96 |
| Figure 3. 20 : Définition des caractéristiques du fluide..... | 97 |
| Figure 3. 21 : Choix de la pression de référence..... | 97 |
| Figure 3. 22 : Valeurs des conditions aux limites..... | 98 |
| Figure 3. 23 : Vitesse d'entrée..... | 98 |
| Figure 3. 24 : Parois inférieure et supérieure..... | 99 |
| Figure 3. 25 : Pression à la sortie..... | 99 |
| Figure 3. 26 : Choix d'ordre des équations et l'algorithme..... | 100 |
| Figure 3. 27: Initialisation du calcul | 100 |
| Figure 3. 28 : Choix des critères de convergence..... | 101 |
| Figure 3. 29 : Choix du nombre des itérations | 101 |
| Figure 3.30 : Géométrie mur trombe..... | 102 |
| Figure 3.31. : Géométrie étudiée (la salle)..... | 103 |
| Figure 3.32 : Amplitude de la vitesse ($Q=1000 \text{ w/m}^2$ et $V= 3 \text{ m/s}$)..... | 104 |
| Figure 3.33 : Graphe de la position en fonction de l'amplitude de la vitesse ($Q=1000 \text{ w/m}^2$ $V= 3 \text{ m/s}$)..... | 105 |
| Figures 3.34 : Contours de Vitesse longitudinale ($Q=1000 \text{ w/m}^2$ et $V= 3 \text{ m/s}$)..... | 106 |
| Figure 3.35 : Vitesse transversale ($Q=1000 \text{ w/m}^2$ et $V= 3 \text{ m/s}$)..... | 106 |
| Figure 3.36 : Contours des lignes de courant ($Q=1000 \text{ w/m}^2$ et $V= 3 \text{ m/s}$)..... | 107 |
| La figure 3.37 : Contours de température ($Q=1000 \text{ w/m}^2$ et $V= 3\text{m/s}$)..... | 107 |
| Figure 3.38 : Energie cinétique turbulente ($Q=1000 \text{ w/m}^2$ et $V= 3 \text{ m/s}$)..... | 110 |
| Figure 3.39 : Représente le Taux de dissipation epsilon pour la salle. ($Q=1000 \text{ w/m}^2$ et $V=$ m/s)..... | 111 |

| | |
|--|-----|
| Figure 3.40 : Le Contours d'amplitude de la vitesse pour la salle (Q=1000 w/m ² et V= m/s)..... | 112 |
| Figure 3.41 : Graphe de la position en fct de l'amplitude de la vitesse (Q=1000 w/m ² et V= 1,5 m/s)..... | 113 |
| Figures 3.42 : Contours de Vitesse longitudinale (Q=1000 w/m ² et V= 1.5 m/s)..... | 113 |
| Figure 3.43 : Vitesse transversale (Q=1000 w/m ² et V= 1.5 m/s)..... | 114 |
| Figure 3.44 : Contours des lignes de courant (Q=1000 w/m ² et V= 1.5 m/s)..... | 114 |
| Figure 3.45 : Contours de température (Q=1000 w/m ² et V= 1.5 m/s)..... | 115 |
| Figure 3.46 : Energie cinétique turbulente (Q=1000 w/m ² et V= 1.5 m/s)..... | 116 |
| La figure 3.47 : Représente le Taux de dissipation epsilon pour la salle. (Q=1000 w/m ² et 1.5 m/s)..... | 117 |
| Figure 3. 48 : Le Contours d'amplitude de la vitesse pour la salle (Q=500 w/m ² et V= 3 m/s)..... | 117 |
| Figure 3 .49 : Graphe de la position en fct de l'amplitude de la vitesse (Q=500 w/m ² et V= m/s)..... | 118 |
| Figures 3.50 : Contours de Vitesse longitudinale (Q=500 w/m ² et V= 3 m/s)..... | 118 |
| Figure 3.51 : Vitesse transversale (Q=500 w/m ² et V= 3 m/s)..... | 119 |
| Figure 3.52 : Contours des lignes de courant (Q=500 w/m ² et V= 3 m/s)..... | 120 |
| Figure 3.53 : Contours de température (Q=500 w/m ² et V= 3 m/s)..... | 120 |
| Figure 3.54 : Energie cinétique turbulente (Q=500 w/m ² et V= 3 m/s)..... | 122 |
| Figure 3.55 : Taux de dissipation epsilon pour la salle. (Q=500 w/m ² et V= 3 m/s)..... | 122 |
| Figure 3.56 : Le Contours d'amplitude de la vitesse pour la salle (Q=500 w/m ² et V= 1 m/s)..... | 123 |
| Figures 3. 58: Contours de Vitesse longitudinale (Q=500 w/m ² et V= 1.5 m/s)..... | 124 |
| Figure 3.59 : Vitesse transversale (Q=500 w/m ² et V= 1.5 m/s)..... | 125 |
| La figure 3.60 : Contours des lignes de courant (Q=500 w/m ² et V= 1.5m/s)..... | 125 |
| Figure 3.61 : Contours de température (Q=500 w/m ² et V= 1.5 m/s)..... | 126 |
| Figure 3.62 : Graphe position en fonction de la température totale (Q=500 w/m ² et V= 1.5 m/s)..... | 126 |
| Figure 3.63 : Energie cinétique turbulente (Q= 500 w/m ² et V= 1.5 m/s)..... | 127 |
| La figure 3.64 : Représente le Taux de dissipation epsilon pour la salle. (Q=500 w/m ² et V 1.5 m/s)..... | 127 |

Liste des tableaux

Chapitre 1 :

Tableau.1.1 : Caractéristiques actuelles des dispositifs à concentration 21

Chapitre 2 :

Tableau 2.1 : Flux par thermo circulation..... 52

Chapitre 3 :

Tableau 3.1 : Conditions Climatique de Tlemcen..... 81

Tableau 3.2 : Différentes caractéristiques des matériaux utilisés..... 86

Tableau 3.3 : Caractéristiques thermique des matériaux de construction..... 86

Tableau 3.4 : Température à l'entrée de la salle 104

Résumé

Ce travail concerne l'étude et simulation d'une cavité couplée à un mur Trombe dans le but de déterminer ses performances thermique du système pour répondre aux besoins en chauffage d'une salle.

Une simulation numérique a été faite pour étudier qualitativement l'aspect dynamique et thermique de la cavité pendant le chauffage par le mur trombe.

L'étude de simulation a été réalisée utilisant le code de calcul Fluent.

Mot-clé : Energie Solaire, Mur Trombe, Mur Solaire, Simulation numérique, Chauffage Solaire, Cavité.

Abstract

Our work involves the study and simulation of a cavity coupled with a trombe wall in order to determine its thermal performance to meet the heating needs of a room.

A numerical simulation was carried out to qualitatively study the dynamic and thermal aspect of the cavity during the heating by the trombe wall.

The simulation study was carried out using the Fluent calculation code.

Keyword: Solar Energy, Trombe Wall, Solar Wall, Numerical Simulation, Solar Heating, Cavity.

تهتم هـ

. (Mur Trombe)

الهدف من هذا العمل هو تحديد الناجعة الحرارية للنظام (-) , و ذلك من اجل تلبية الحاجيات الحرارية

لقد قمنا بتقديم محاكاة عددية بواسطة (Fluent) من اجل دراسة نوعية للظواهر الدينامية و الحرارية للغرفة أثناء تدفنتها

الكلمات المفتاحية: الطاقة الشمسية,

، محاكاة عددية، التدفئة الشمسية،

| | |
|--|----|
| Introduction général | 1 |
| Chapitre I : | |
| Introduction | 3 |
| 1.1 Histoire de l'énergie solaire | 4 |
| 1.2 Définition et catégories | 5 |
| 1.3 Fonctionnement technique ou scientifique | 5 |
| 1.3.1 Rayonnement solaire | 5 |
| 1.3.2 Composante du rayonnement solaire..... | 6 |
| 1.3.3 Les caractéristiques du rayonnement solaire sur Terre..... | 7 |
| 1.3.3.1 L'exploitation de l'énergie solaire..... | 7 |
| 1.3.3.1.1 L'énergie solaire thermique..... | 7 |
| 1.3.3.1.2 L'énergie solaire thermodynamique..... | 8 |
| 1.3.3.1.3 L'énergie solaire photovoltaïque..... | 8 |
| 1.4 Types d'énergies renouvelables | 9 |
| 1.4.1 Énergie éolienne | 9 |
| 1.4.2 Énergie hydraulique..... | 10 |
| 1.4.3 Énergie géothermique..... | 11 |
| 1.4.4 Énergie solaire..... | 12 |
| 1.4.5 Énergie Biomasse | 13 |
| 1.5 Energie Solaire thermique | 14 |
| 1.5.1 Basse Température | 15 |
| 1.5.1.1 Séchage (Capteur a air) | 15 |
| 1.5.1.2 Chauffage solaire (eau)..... | 17 |
| 1.5.2 haute Température..... | 20 |
| 1.5.2.1 Concentrateurs paraboliques | 21 |
| 1.5.2.2 Centrales à tour..... | 23 |
| 1.5.2.3 Capteurs cylindro-parabolique | 26 |
| 1.5.2.4 Fresnel..... | 27 |
| CONCLUSION | 28 |

Chapitre 2 :

| | |
|--|----|
| Introduction | 29 |
| Les différents systèmes solaires passifs de façade | 30 |
| 2.1 Etude Théorique sur le mur de Trombe | 40 |
| 2.1.1 Le fonctionnement d'un mur Trombe..... | 40 |
| 2.1.2 Le principe des murs capteurs accumulateurs..... | 41 |
| 2.1.3 La spécificité du mur Trombe..... | 42 |
| 2.1.4 La réponse du mur Trombe aux besoins de chauffage..... | 43 |
| 2.1.5 L'importance fondamentales des couleurs et des matières utilisés derrière les verres du m trombe | 44 |
| 2.1.6 Mur Trombe : Avantages et Inconvénients..... | 45 |
| 2.1.7 Opération du mur trombe | 45 |
| 2.1.7.1 Fonctionnement de la paroi thermique en hiver..... | 45 |
| 2.1.7.2 Fonctionnement de la paroi thermique en été..... | 48 |
| 2.1.7.3 Calculs de l'inertie thermique | 49 |
| 2.1.7.4 Masse thermique (le mur)..... | 50 |
| 2.1.7.5 Thermo-circulation..... | 51 |
| 2.1.8 Exemples sur la performance de mure trombe..... | 53 |
| 2.1.8.1 Performances du mur Trombe (Nord de l'Algérie)..... | 53 |
| 2.1.8.2 Performances du mur Trombe sur le site de Ghardaïa..... | 54 |
| 2.2 Etude théorique sur la cavité | 63 |
| 2.2.1 La modélisation des transferts de chaleur dans une cavité ventilée naturellement..... | 63 |
| 2.2.2 Les échanges radiatifs..... | 63 |
| 2.2.2.1 Rayonnement solaire et distinction entre CLO et GLO..... | 63 |
| 2.2.2.2 La prise en compte du phénomène de multi-réflexion entre les deux plaques..... | 65 |
| 2.2.2.3 Echange radiatif entre deux surfaces..... | 65 |
| 2.2.2.4 Echange entre la surface extérieure de la protection solaire et l'environnement..... | 66 |
| 2.2.3 Les échanges convectifs..... | 66 |
| 2.2.3.1 Caractérisation de la convection naturelle..... | 66 |
| 2.2.3.2 Approche numérique CFD..... | 68 |
| 2.3 Accouplement d'un mur trombe avec une cavité solaire | 70 |
| 2.3.1 Caractéristiques d'un mur de stockage thermique | 70 |

| | |
|--|------------|
| 2.3.2 Performance de la paroi de stockage thermique..... | 73 |
| Conclusion..... | 77 |
| Chapitre 3 : | |
| Introduction..... | 78 |
| 3.1 Situation géographique de la ville de Tlemcen..... | 79 |
| 3.2 Climat de la ville de Tlemcen..... | 80 |
| 3.3 Description de la salle étudiée..... | 82 |
| 3.3.1 Architecture de la salle | 82 |
| 3.3.1.1. Masse thermique | 83 |
| 3.3.2. Description et matériaux de construction | 83 |
| 3.3 .2.1 Les types de murs..... | 84 |
| 3.3.2.2 Les différents matériaux pour construire un mur..... | 85 |
| 3.3.3 Composante de mur trombe | 89 |
| 3.4. Etude de la cavité couplée avec le mur trombe..... | 90 |
| 3.4.1. Présentation de Gambit et Fluent | 90 |
| 3.4.1.1. Présentation de Gambit | 90 |
| 3.4.1.2. Présentation de Fluent..... | 94 |
| 3.4.1.2. Présentation de Fluent..... | 94 |
| 3.4.2. Simulation et interprétation des résultats | 102 |
| 3.4.2.1. Simulation d'une cavité | 102 |
| 3.4.2.2. Dépouillement et comparaison des Résultats | 121 |
| Conclusion..... | 122 |

Introduction Générale

Introduction générale



Dans le monde, il existe différentes sources d'énergies utilisables afin de pouvoir répondre aux nombreuses demandes de la population mondiale, qui elle, augmente de jours en jours. Ces demandes énergétiques concernent, l'électricité le chauffage, ainsi que les transports.

Dans ces différentes sources d'énergies, deux sortes se distinguent : les énergies fossiles dites non renouvelables et les énergies dites renouvelables. Ces énergies existent sous différentes formes.

Les sources d'énergies renouvelables sont propres, sans danger et inépuisables. Les énergies renouvelables sont aussi appelées "énergies solaires" car elles dépendent tous du soleil. Il est désormais indispensable de développer les énergies renouvelables pour lutter contre l'effet serre, et pour prévoir le remplacement du pétrole.

L'Algérie avec sa situation géographique, occupe une position privilégiée dans l'exploitation d'énergie solaire avec une durée d'ensoleillement qui varie de 2650 heures par an dans le nord à 3500 heures par an dans le sud, l'une des plus élevées au monde.

Le mur trombe est un système de chauffage solaire simple et ingénieux utilisé dans les bâtiments, il est efficace et propre et peut répondre aux problématiques écologiques contemporaines. Cette méthode utilise le chauffage solaire passif qui consiste à exploiter le soleil directement afin de réchauffer l'intérieur des habitations. Concrètement, les pièces bien orientées vers le soleil et équipées de larges baies vitrées laissent mieux passer les rayons solaires. Ce type de chauffage doit être associé à des murs parfaitement isolés.

L'objectif de notre travail est de faire une étude et simulation d'une cavité couplée avec le mur trombe. Pour pouvoir déterminer ces performances thermiques notamment son amplitude de la vitesse, le champ de température et le champ de turbulence.

Nous avons articulé l'exposé de nos travaux autour de trois parties :

Le premier chapitre contient une brève présentation sur le rayonnement solaire en Algérie, L'exploitation de l'énergie solaire et les différents types d'énergies renouvelables.

Le deuxième chapitre présente le fonctionnement et le principe d'un mur Trombe et nous avons procédé sur l'étude théorique sur les cavités.

Dans Le dernier chapitre nous avons procédé a une simulation par Fluent et Gambit pour voir les performances et les besoins thermiques de la salle.

Enfin, nous terminons ce travail avec une conclusion générale.

Chapitre I :
Généralité sur l'énergie solaire

INTRODUCTION

Les réserves gazeuses du soleil se comptant en milliards d'années de fusion, l'énergie solaire est, à l'échelle de l'homme, illimitée. Elle est classée parmi les énergies renouvelables.

L'énergie solaire est l'énergie diffusée par le rayonnement du Soleil. Des ondes radio aux rayons gamma en passant par la lumière visible, tous ces rayonnements sont constitués de photons, les composants fondamentaux de la lumière et les vecteurs de l'énergie solaire. L'énergie solaire est issue des réactions de fusion nucléaire qui animent le Soleil.

1.1 Histoire de l'énergie Solaire

1839 : Antoine Becquerel (1788-1878) découvre le phénomène photovoltaïque et invente la pile photovoltaïque.

1912 : première mise en œuvre d'un capteur cylindro-parabolique inventé par Charles Vernon Boys (1855-1944), un physicien anglais.

1949 : Félix Trombe (1906-1985), un chimiste française, développe les systèmes passifs de chauffage solaire et notamment le "mur Trombe". Il participe également au développement des fours solaires successifs du site d'Odeillo.

1959 : lancement de Vanguard I, le premier satellite fonctionnant à l'énergie photovoltaïque.

Années 70 : les deux chocs pétroliers relancent l'intérêt porté aux énergies solaires.

Années 80 : les développements sont freinés pour des raisons de rentabilité liées notamment aux technologies trop coûteuses.

Années 1990 : un nouvel essor s'amorce.

Années 2000 : les énergies solaires thermique et photovoltaïque se développent rapidement en France. Entre 2007 et 2009, leurs productions énergétiques respectives ont été multipliées par 2 et par 7.

2012 : la puissance photovoltaïque mondiale raccordée aux réseaux dépasse la barre des 100 GW.

Futur

L'électricité solaire pourrait représenter jusqu'à 20% à 25% de la production mondiale d'électricité d'ici 2050. Cette constatation émane de deux nouvelles analyses de l'Agence internationale de l'énergie (AIE) sur le solaire photovoltaïque (PV) et l'énergie solaire à concentration (CSP), lancées à Valence en Espagne en mai 2010 lors de la Conférence plan solaire méditerranéen organisée par la présidence espagnole de l'UE.

1.2 Définition et catégories

Sur Terre, l'énergie solaire est à l'origine du cycle de l'eau, du vent et de la photosynthèse du règne végétal. Le règne animal, y compris l'humanité, dépendent des végétaux sur lesquels sont fondées toutes les chaînes alimentaires.

L'énergie solaire est à l'origine de toutes les formes de production énergétique aujourd'hui utilisées sur Terre, à l'exception de l'énergie nucléaire, de la géothermie et de l'énergie marémotrice. L'homme utilise l'énergie solaire pour la transformer en d'autres formes d'énergie : énergie chimique (les aliments que notre corps utilise), énergie cinétique, énergie thermique, énergie électrique ou biomasse.

Par extension, l'expression « énergie solaire » est souvent employée pour désigner l'électricité ou l'énergie thermique obtenue à partir de la source énergétique primaire qu'est le rayonnement solaire.

Actuellement, il existe deux voies principales d'exploitation de l'énergie solaire :

Le solaire photovoltaïque qui transforme directement le rayonnement en électricité ; Le solaire thermique qui transforme directement le rayonnement en chaleur ; Le solaire dit « thermodynamique » est une variante du solaire thermique. Cette technique se différencie en cela qu'elle utilise l'énergie thermique du soleil afin de la transformer dans un second temps en électricité.

Il est relativement complexe de récupérer l'énergie solaire afin de la transformer en électricité ou en chaleur, et encore plus de la stocker. L'exploitation de cette source énergétique est récente et se développe rapidement dans les régions bien exposées. Elle reste néanmoins encore coûteuse. De nombreux programmes de recherche sont en cours afin d'améliorer les rendements des nouvelles technologies d'exploitation de l'énergie solaire.[1]

1.3 Fonctionnement technique et scientifique

1.3.1 Rayonnement solaire

Le rayonnement Solaire est une énergie produite par le Soleil à la suite de réactions de fusion thermonucléaire qui dégage une très grande quantité d'énergie, source de la plupart des énergies disponibles sur Terre et exploitable pour la production d'électricité.

L'énergie solaire se propage dans l'espace sous la forme de « grains », ou quanta d'énergie, les photons ; elle est sans cesse renouvelée.

1.3.2 Composante du rayonnement solaire

Le rayonnement qui nous parvient du soleil est émis par sa surface extérieure dont la température est d'environ 6000 °K. A une telle température, 40% de l'énergie est émise dans le domaine visible (gamme de longueur d'onde allant de 0,3 μm (violet - bleu) à 0,7 μm (rouge). La décomposition du rayonnement solaire peut être réalisée en projetant un faisceau lumineux sur un prisme de verre ou sur un réseau de diffraction. Tout un éventail de couleurs apparaît, du bleu au rouge en passant par le vert et le jaune.

Chacune de ces couleurs est associée à un rayonnement d'une certaine longueur d'onde. William Herschell (Vers 1800) qui étudiait le rayonnement solaire, avait placé un thermomètre derrière un tel prisme. Il s'aperçut qu'il indiquait une élévation de température (et donc qu'il recevait de l'énergie) non seulement dans le domaine visible mais également dans la région au- delà du rouge. Ce fut la découverte du rayonnement infrarouge qui représente 50% du rayonnement émis par le soleil. Les 10% restant du rayonnement solaire total sont émis à l'opposé du domaine visible, à des longueurs d'onde plus petites que celles du violet (l'ultra violet). [2]

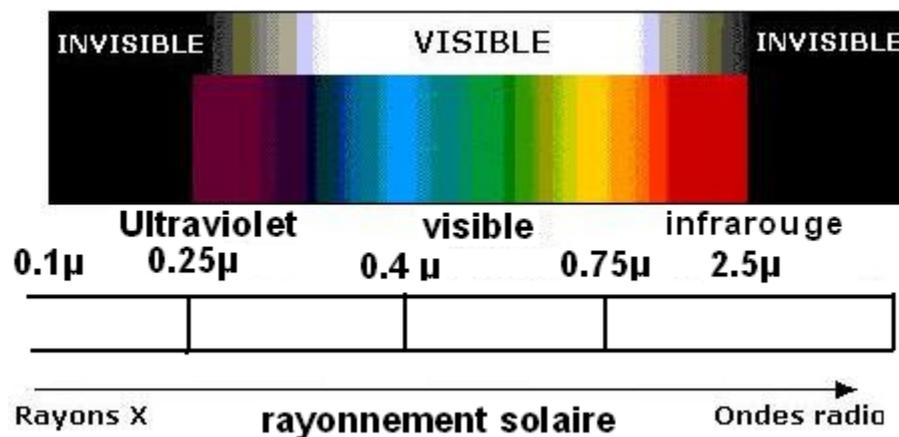


Figure 1.1 La longueur d'onde de rayonnement solaire [2]

1.3.3 Les caractéristiques du rayonnement solaire sur Terre

L'énergie solaire reçue en un point du globe dépend de :

L'énergie solaire envoyée par le Soleil, qui fluctue avec son activité de fusion ; la nébulosité (nuages, brouillards, etc.), qui est par exemple importante à l'équateur et plus faible en milieu intertropical ; la latitude, la saison et l'heure, qui influent sur la hauteur du soleil dans le ciel et donc l'énergie reçue par unité de surface au sol.

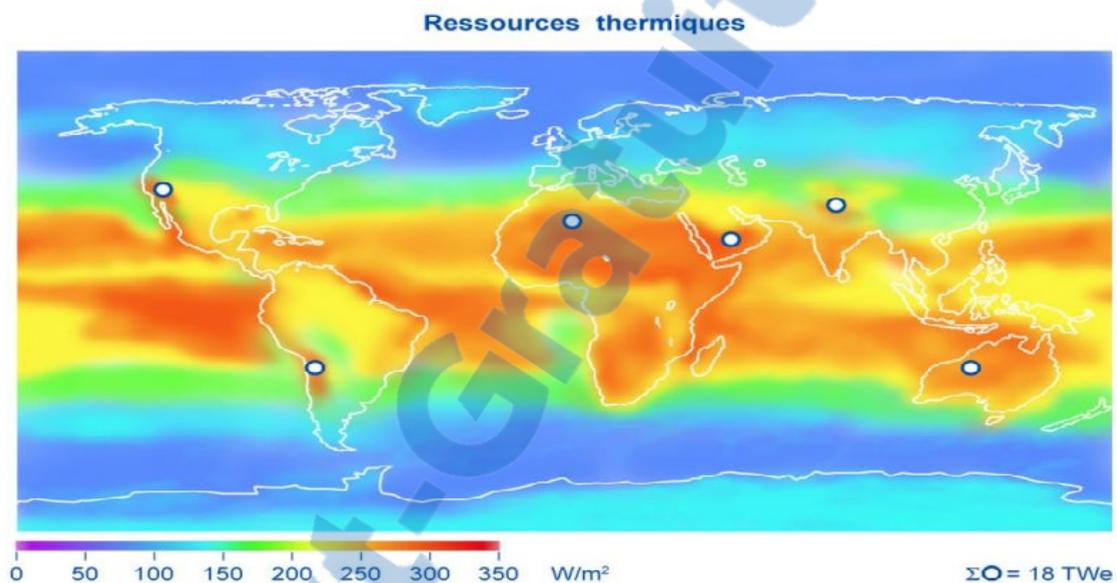


Figure 1.2 ressources thermiques

1.3.3.1 L'exploitation de l'énergie solaire

Trois familles de procédés de transformation de l'énergie solaire se distinguent aujourd'hui.

1.3.3.1.1 L'énergie solaire thermique

L'énergie solaire thermique consiste à utiliser la chaleur du rayonnement solaire :

En usage direct de la chaleur : chauffe-eau et chauffages solaires, cuisinières et sécheuses solaires.

En usage indirect, la chaleur servant pour un autre usage : rafraîchissement solaire, dessalement, etc.

De fait, elle est utilisée principalement pour le chauffage de l'eau ou des locaux. On utilise pour cela des capteurs thermiques. Il en existe plusieurs catégories, mais le principe est toujours le même : le capteur thermique absorbe les photons solaires et les transforme en chaleur. Celle-ci est ensuite transmise à un liquide ou à un gaz qui la transporte (le gaz est alors dit « caloporteur ») vers un réservoir de stockage de chaleur.

1.3.3.1.2 L'énergie solaire thermodynamique

L'énergie thermique du Soleil permet également de produire de l'électricité par voie thermodynamique. Le principe est identique à celui d'une centrale électrique classique : la production de vapeur ou de gaz à haute pression est turbinée pour être ensuite transformée en électricité. Ce processus nécessite des températures importantes (de 250°C à plus de 1 000°C) que l'on atteint en concentrant la lumière solaire avec des miroirs vers un fluide caloporteur.

Parmi les technologies de concentration majeures peuvent être citées :

- Les centrales solaires cylindro-paraboliques avec concentration linéaire, équipées d'auges paraboliques ;
- Les centrales solaires à miroirs de Fresnel avec concentration linéaire, équipées de lames de miroirs légèrement incurvées ;
- Les centrales solaires à tour avec héliostats renvoyant le rayonnement sur le concentrateur ;
- Les paraboles solaires Dish-Stirling avec une concentration ponctuelle, équipées d'un moteur Stirling (moteur à air chaud).

Elles permettent le stockage d'une partie de l'énergie sous forme de chaleur. Ce stockage permet de diminuer les conséquences de l'intermittence de la ressource solaire en permettant, par exemple, de continuer à produire de l'électricité après le coucher du soleil.

1.3.3.1.3 L'énergie solaire photovoltaïque

Le terme « photovoltaïque » peut désigner le phénomène physique (découvert par Alexandre Edmond Becquerel en 1839), ou la technique associée. L'intérêt de cette technique est de convertir l'énergie du Soleil directement en électricité.

L'énergie solaire photovoltaïque est l'électricité produite par transformation d'une partie du rayonnement solaire dans une cellule photovoltaïque. Les cellules photovoltaïques sont fabriquées à partir de matériaux semi-conducteurs, comme le silicium, produits à partir d'une matière première de très grande pureté.

Cette forme d'énergie reste aujourd'hui quantitativement limitée ; on lui prédit néanmoins un grand avenir grâce aux progrès attendus, à la baisse des coûts, à sa simplicité et à sa polyvalence. Sans entretien et durable, pouvant fonctionner avec ou sans raccordement à un réseau, elle peut répondre aux besoins en énergie électrique d'une maison (capteurs sur le toit) ou d'une industrie.

La première application est apparue dans le domaine spatial pour les satellites. D'autres secteurs ont ensuite utilisé la technologie photovoltaïque, notamment les télécommunications, le balisage maritime et aérien, l'éclairage domestique et le pompage de l'eau. Mais comme le Soleil n'est pas visible en un point de la Terre 24 heures sur 24, cette application nécessite l'utilisation de batteries ou autres systèmes qui assurent le stockage de l'énergie en vue d'une consommation hors période d'ensoleillement.[1]

1.4 Types d'énergies renouvelables

Les énergies renouvelables constituent une solution respectueuse de l'environnement pour y parvenir en partie. Elles permettent d'acquérir une certaine autonomie énergétique et de réaliser des économies à moyen et long terme. [3]

4-1-Énergie éolienne

L'activité solaire est la principale cause des phénomènes météorologiques. Ces derniers sont notamment caractérisés par des déplacements de masses d'air à l'intérieur de l'atmosphère. C'est l'énergie mécanique de ces déplacements de masses d'air qui est à la base de l'énergie éolienne. L'énergie éolienne consiste ainsi à utiliser cette énergie mécanique. [3]



Figure 1.3 Énergie éolienne [3]

1.4.2 Énergie hydraulique

À l'instar de l'énergie éolienne, les énergies hydrauliques (à l'exception de l'énergie marémotrice) ont leur origine principale dans Les phénomènes météorologiques et donc l'énergie solaire. Le soleil provoque l'évaporation de l'eau, principalement dans les océans et en libère une partie sur les continents à des altitudes variables. On parle du cycle de l'eau pour décrire ces mouvements. L'eau (en fait, la vapeur d'eau) possède, en altitude, une énergie potentielle de

pesanteur ; cette énergie peut être captée et transformée dans des barrages hydroélectriques, lors du retour de l'eau vers les océans. Avant l'avènement de l'électricité, les moulins à eau permettaient de capter cette énergie mécanique pour entrainer des machines ou des outils (machines à tisser, moulins à moudre le blé...). [3]

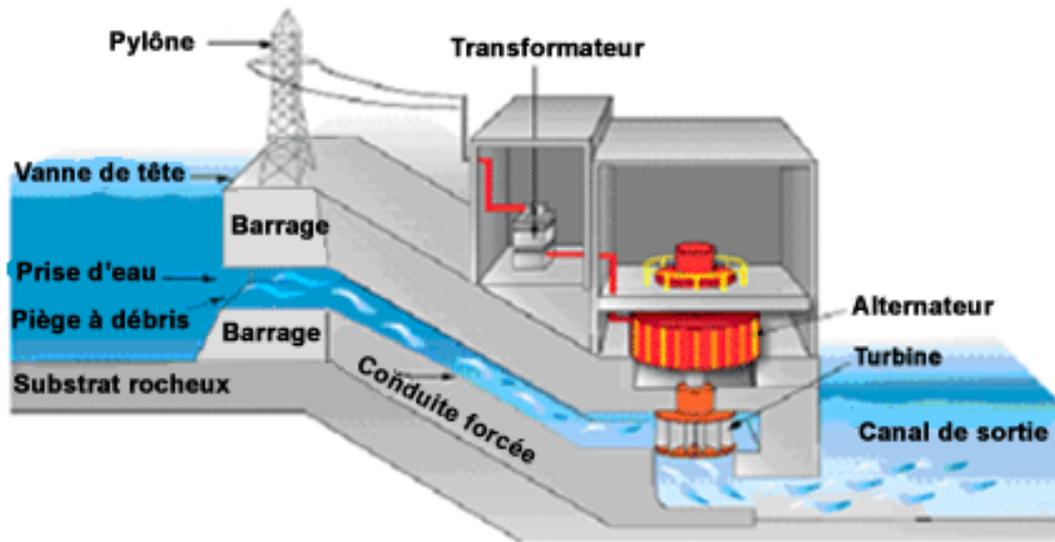


Figure 1.4 Énergie hydraulique [3]

1.4.3 Energie géothermique

Le principe consiste à extraire l'énergie géothermique contenue dans le sol pour l'utiliser sous forme de chauffage ou pour la transformer en électricité. Dans les couches profondes, la chaleur de la Terre est produite par la radioactivité naturelle des roches du noyau et de la croûte terrestre : c'est l'énergie nucléaire produite par la désintégration de l'uranium, du thorium et du potassium. [3]

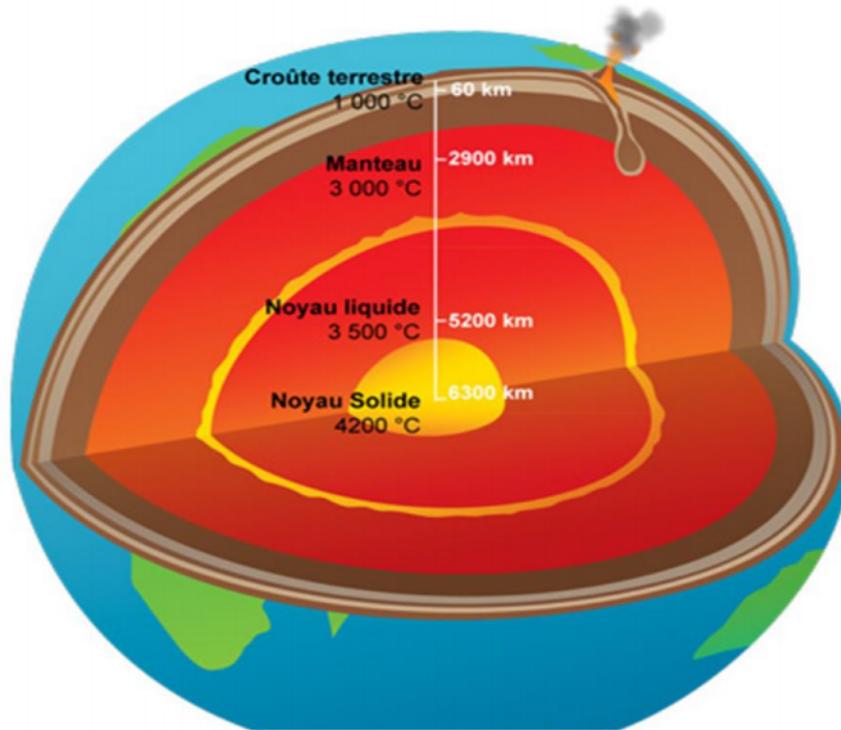


Figure 1.5 Énergie géothermique [3]

1.4.4 Énergie solaire

Elle est renouvelable et écologique, elle peut être exploitée pratiquement partout sur la planète, contrairement aux combustibles fossiles, et elle n'est pas à la merci des hausses des prix de l'énergie. Elle est polyvalente, et produit de la chaleur, la lumière, l'énergie mécanique et l'électricité.

L'énergie solaire est l'énergie radiante produit par le soleil par réactions nucléaires de fusion, qu'arrive à la Terre à travers de l'espace en Quant d'énergie (Photons), ceux qui réagissent avec l'atmosphère et la surface terrestre. Mais l'intensité de l'énergie réellement disponible dans la surface terrestre est plus faible que celle qui arrive à l'extérieur de l'atmosphère, par l'absorption et la dispersion produit par l'interaction entre photons et l'atmosphère. [3]

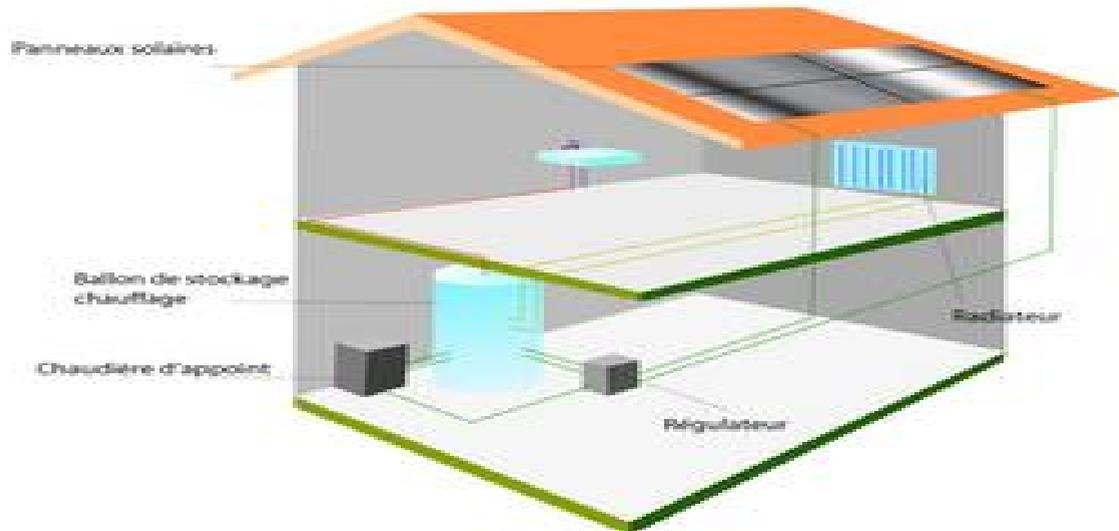


Figure 1.6 Énergie solaire [3]

1.4.5 Énergie Biomasse

Indirectement, il s'agit d'énergie solaire stockée sous forme organique grâce à la photosynthèse. Elle est exploitée par combustion ou métabolisation. Cette énergie est renouvelable à condition que les quantités brûlées n'excèdent pas les quantités produites ; cette condition n'est pas toujours remplie. On peut citer notamment le bois et les biocarburants. [3]

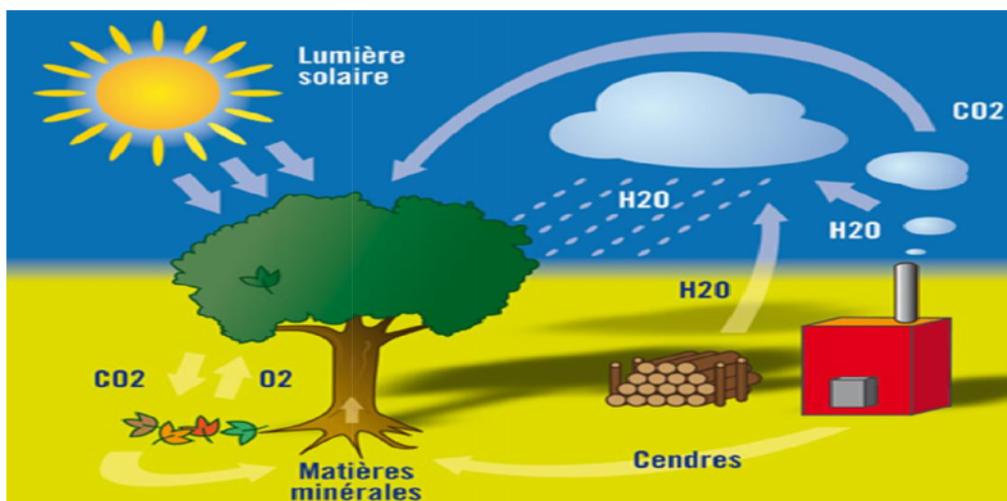


Figure 1.7 Énergie Biomasse [3]

1.5 Energie Solaire thermique

Un système solaire thermique exploite le rayonnement du Soleil afin de le transformer directement en chaleur (énergie calorifique).

Le soleil émet un rayonnement électromagnétique dans lequel se trouvent notamment les rayons cosmiques, gamma, X, la lumière visible, l'infrarouge, les micro-ondes et les ondes radios en fonction de la fréquence d'émission. Tous ces types de rayonnement électromagnétique véhiculent de l'énergie. Le niveau d'irradiance (le flux énergétique) mesuré à la surface de la Terre dépend de la longueur d'onde du rayonnement solaire.

Deux grandes familles d'utilisation de l'énergie solaire à cycle court se distinguent :

L'énergie solaire thermique (Basse Température), utilisation de la chaleur transmise par rayonnement,

l'énergie photovoltaïque (Haute Température), utilisation du rayonnement lui-même pour produire de l'électricité.[4]

Les avantages de l'énergie solaire :

- une bonne source d'énergie renouvelable
- Une énergie non polluante
- la lumière ne coute rien

Les inconvénients de l'énergie solaire :

- il n'y a de lumière la nuit.
- A besoin de beaucoup d'espace.
- le placement peut modifier l'énergie pris dans les panneaux.
- Panneau fragile.

1.5.1 Basse Température

- **La technologie solaire « active » :** traditionnellement, ce terme désigne les applications à basse et moyenne température. Des capteurs solaires thermiques sont installés sur les toits des bâtiments. Un capteur solaire thermique est un dispositif conçu pour recueillir l'énergie provenant du Soleil et la transmettre à un fluide caloporteur. La chaleur est ensuite utilisée afin de produire de l'eau chaude sanitaire ou bien encore chauffer des locaux.
- **La technologie solaire « passive » :** toujours dans le domaine de la basse température, on peut également citer les installations solaires passives. Par opposition aux applications précédentes, celles-ci ne requièrent pas de composants dits actifs (les capteurs solaires). Ces applications reposent sur des concepts de génie civil et climatique impliquant une architecture adaptée et l'emploi de matériaux spéciaux. L'utilisation passive de l'énergie du Soleil permet de chauffer, d'éclairer ou de climatiser des locaux.[5]

1.5.1.1 Séchage (Capteur à air)

Le séchage est requis pour divers types de cultures et de produits, comme les céréales, le café, le tabac, les fruits les légumes et le poisson. Leur qualité peut être améliorée si le séchage est correctement effectué. La technologie solaire thermique peut être utilisée pour aider à l'assèchement de ces produits. Le principe essentiel de l'opération est d'augmenter la chaleur du produit, ce qui a généralement lieu dans un compartiment ou un box.

Si l'énergie solaire est utilisée sous toutes les latitudes et depuis toujours pour sécher les aliments, les utilisations de capteurs solaires sont très dispersées. Beaucoup de matériels restent à l'état de prototypes et peu de réalisations ont connu des généralisations. Des recherches sont encore à promouvoir pour mieux connaître les produits et leurs aptitudes au séchage d'une façon générale, et au séchage lié aux caprices des conditions météorologiques. Ces recherches permettront de proposer des méthodes de séchage direct, ce qui permettra de réduire les pertes après-récolte et de fournir un produit séché ou un produit marchand de meilleure qualité.[6]

Les technologies solaires de séchage peuvent aider à réduire la dégradation environnementale causée par l'utilisation du bois de chauffage ou des combustibles fossiles pour le séchage des récoltes et peut aussi contribuer à réduire les coûts associés à ces carburants et donc le coût du produit. Aider à améliorer et à protéger les cultures a aussi des effets bénéfiques sur la santé et la nutrition. On prend pour exemple

Le séchage solaire des plantes aromatiques et médicinales

Le séchage des plantes aromatiques et médicinales (PAM) est une étape essentielle dans l'industrie agro-alimentaire et pharmaceutique, car tout en facilitant les prochaines étapes de transformation, elle permet aux plantes de garder toutes leurs qualités et permet de les conserver plus longtemps.

L'Algérie, de par sa position géographique, jouit de conditions climatiques et de ressources hydriques très favorables au développement de cultures intensives des PAM. Cependant cette filière reste encore très peu développée dans notre pays.

Depuis plusieurs années, l'équipe Système Solaire Basses Températures du CDER, à travers le projet séchage solaire, s'intéresse au rôle que peut apporter l'énergie solaire au développement de l'industrie agro-alimentaire et pharmaceutique. A cet effet, un premier séchoir solaire indirect destiné au séchage des plantes aromatiques et médicinales a été réalisé et testé pour le séchage de quelques plantes aromatiques. Il se compose d'un capteur solaire plan à air à simple circulation et à simple vitrage. Il est constitué d'un box en tôle galvanisée recouvert d'un vitrage transparent au rayonnement solaire et d'un absorbeur noir. Le box est isolé par de la mousse de polyuréthane. L'air circule entre l'isolant et l'absorbeur à l'intérieur de couloirs réalisés en bois. A l'entrée et a la sortie du capteur, deux tuyères sont placées respectivement pour l'admission et l'échappement de l'air. Le séchoir réalisé se compose également d'une boîte de séchage parallélépipédique réalisée entièrement en tôle galvanisée et isolée de l'intérieur. Sur sa face avant, une porte à doubles battants permet le chargement et le déchargement des produits à sécher. Ceux-ci sont disposés sur des claies en grillage permettant le passage de l'air.[7]



Figure 1.8 Séchoir solaire indirect destiné au séchage des PAM, réalisé au CDER [7]

1.5.1.2 Chauffage à eau (capteur à eau)

Une des applications principales de l'énergie solaire basse température est le chauffage d'eau en vue d'un usage domestique.

Pour faire chauffer de l'eau avec des panneaux solaires, on utilise un circuit fermé dans lequel circule un liquide caloporteur : de l'eau mélangé à un antigel, pour éviter les problèmes de formation de glace en hivers.

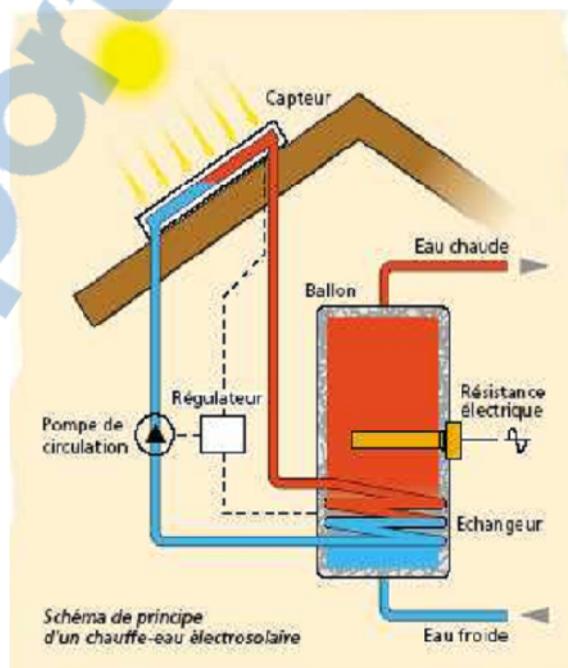


Figure1.9 Chauffage à eau [7]

Le capteur solaire absorbe le rayonnement solaire et transmet la chaleur au fluide caloporteur passant dans une tubulure. La chaleur ainsi captée est ensuite transférée vers un réservoir de stockage à l'aide d'un échangeur thermique. Il se présente sous forme de caissons de différentes dimensions, ou sous forme d'éléments séparés à intégrer directement dans l'architecture des bâtiments. Ses dimensions peuvent varier de quelques mètres carrés (individuel) à plusieurs centaines de mètres carrés (installations collectives).

Il existe principalement trois types de capteurs solaires : le capteur plan vitré, le capteur sous vide, et le capteur plan non vitré.

Les rayons du soleil, piégés par des capteurs thermiques vitrés, transmettent leur énergie (énergie solaire) à des absorbeurs métalliques - lesquels réchauffent un réseau de tuyaux de cuivre où circule un fluide caloporteur. Cet échangeur chauffe à son tour l'eau stockée dans un cumulus. Un chauffe-eau solaire produit de l'eau chaude sanitaire ou du chauffage généralement diffusé par un "plancher solaire direct".

Tous les dispositifs qui agissent comme capteurs solaires thermiques sont de plus en plus intégrés dans les projets d'architecture bioclimatique (maisons solaires, serres, murs capteurs, murs Trombe...).

Un capteur solaire thermique (ou capteur hélio-thermique ou collecteur solaire ou simplement capteur solaire) est un dispositif conçu pour recueillir l'énergie solaire transmise par rayonnement et la communiquer à un fluide caloporteur (gaz ou liquide) sous forme de chaleur afin de contribuer à la production d'eau chaude.

La température de l'eau chaude sanitaire est en effet relativement réduite (60°C environ) et les capteurs solaires plans conviennent bien à ce type de production d'eau chaude.

On trouve principalement deux sortes d'installations : le système à thermosiphon, (ou direct) et le système à circulation forcé. Notons qu'il n'est pas nécessaire, dans les régions fortement ensoleillées, de réaliser un système avec un matériel spécialisé. Un simple réservoir cylindrique placé en toiture et peint en couleur foncée peut servir à la fois de capteur solaire et de stockage d'eau chaude. Une arrivée d'eau froide et un départ d'eau chaude vers l'utilisation suffisent.

- **Système direct**

Dans ce système, simplifié à l'extrême, c'est l'eau chaude sanitaire qui circule elle-même dans le capteur et, Cette circulation s'effectue par thermosiphon : l'eau en passant dans le capteur s'échauffe et, devenant moins dense, crée une dépression qui aspire l'eau plus dense qui entre dans le capteur. Il faut veiller cependant à ce que la perte de charge du circuit ne soit pas trop importante. Un tel système est schématisé à la figure

Ce système impose d'installer le ballon de stockage plus haut que le capteur. Celui-ci étant souvent placé en toiture, le ballon de stockage devient le point le plus haut de l'habitation ce qui n'est pas nécessairement recherché. Cette contrainte peut en effet être inacceptable pour des raisons esthétiques.

Pour éviter les pertes thermiques en ligne. Il faut veiller à réduire les distances séparant les différents organes. Une bonne isolation thermique des canalisations est recommandée.

Il ne faut pas oublier de prévoir un vase d'expansion pour encaisser les variations de volume de l'eau du circuit avec la température.

Un inconvénient de ce système est qu'on ne peut pas régler le débit du fluide caloporteur. Celui-ci influe sur la température T_{fs} de sortie du fluide caloporteur et par suite sur le rendement de l'installation.

Un tel système a pour avantage principale sa simplicité mais on doit faire attention au risque d'entartrage des canalisations qui sont parcourues par l'eau pouvant être traitée. Pour cette même raison il faut veiller à vidanger le circuit lorsque des périodes de gel. Si ces contraintes sont trop gênantes, il faut prévoir un échangeur de chaleur dans le ballon de stockage. Un échangeur aura un bon rendement si le débit qui le traverse est suffisamment élevé ce qui limite l'efficacité de l'échangeur.

- **Système Indirect**

Dans ce système, l'eau qui circule dans le capteur est différente de l'eau chaude sanitaire. On peut donc traiter le fluide caloporteur avec un antigel, un anticorrosif, un antifongique, ... en contre partie, un échangeur de chaleur est nécessaire.



Un avantage de ce système est la possibilité d'obtenir dans le ballon de stockage une stratification des couches d'eau à températures différentes, les couches les plus chaudes étant sur en partie haute.

Si une énergie d'appoint s'avère nécessaire, elle devra être apportée en partie haute du stockage. On peut installer ou utiliser une chaudière déjà existante en la plaçant en aval de l'installation solaire. Elle sert à remonter la température de l'eau chaude du ballon selon les besoins.

Dans tous les cas une étude économique s'avère nécessaire pour dimensionner la batterie du capteur ainsi que la chaudière d'appoint, dans le cas d'une création complète d'un système de chauffage. [8]

1.5.2 HAUTE TEMPERATURE (Concentrateur Solaire)

Parmi les très nombreux dispositifs optiques permettant de dévier les rayons du soleil pour les concentrer, nous ne considérons ici que ceux qui se prêtent à une mise en œuvre industrielle pour des puissances moyennes ou fortes et qui conduisent à la production de chaleur à une température supérieure à 250 °C. Ces dispositifs optiques mettent en œuvre des surfaces réfléchissantes constituées de miroirs. La nature géométrique des surfaces mises en œuvre et la complexité des structures supportant les miroirs définissent les systèmes concentrateurs. On distingue quatre familles de centrales solaires à concentration :

- les centrales à collecteurs cylindro-paraboliques ;
- les centrales à tour à récepteur central ;
- les systèmes parabole-moteurs ;
- les centrales à réflecteurs linéaires de Fresnel.

Les dispositifs concentrateurs associés sont schématisés sur la figure 2.1. Ces dispositifs se distinguent par leurs dimensions élémentaires, donc leur puissance, leurs performances optiques et thermiques et leur coût. Ces caractéristiques principales sont indiquées dans le tableau 1.

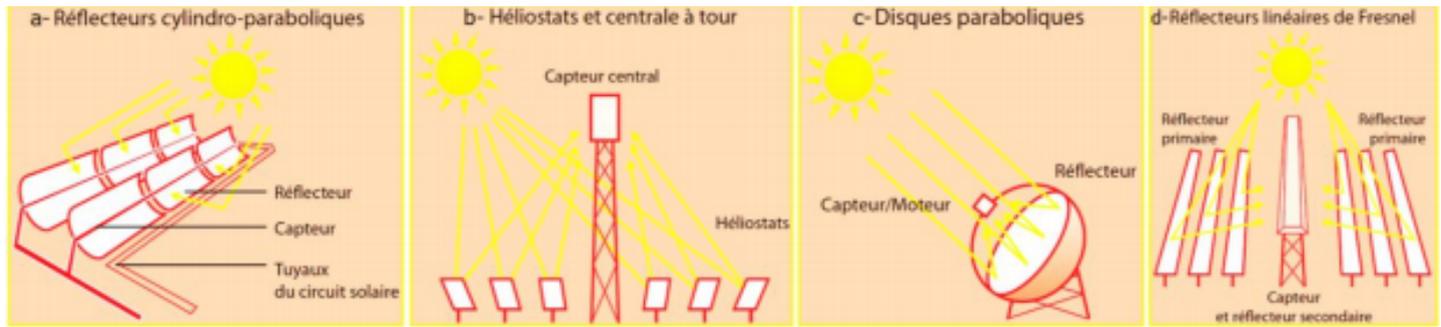


Figure 1.10 Schéma de principe des principales filières solaires à concentration [8]

| Technologie | Cylindro-parabolique | Tour | Parabole |
|-----------------------------|--------------------------------|----------------------------|--------------------------|
| Rendement thermique nominal | 70 % | 73 % | 75 % |
| Puissance des installations | 80 à 300 MW _{th} | 10 à 100 MW _{th} | 1 à 100 kW _{th} |
| Température de travail | 270 à 450 °C | 450 à 1 000 °C | 600 à 1 200 °C |
| Prix du champ solaire | 210 à 250 €/m ² (3) | 140 à 220 €/m ² | ≈150 €/m ² |
| Coût total d'investissement | 2,8 à 3,5 €/W _e | 3 à 4 €/W _e | 10 à 14 €/W _e |

Tableau.1.1 Caractéristiques actuelles des dispositifs à concentration [8]

1.5.2.1 Concentrateur parabolique

Le concentrateur parabolique met en œuvre la surface réfléchissante idéale pour concentrer au mieux les rayons lumineux, à savoir la parabole de révolution. La contrainte est d'orienter en permanence l'axe de la parabole dans la direction du soleil. Les rayons solaires réfléchis par la parabole convergent alors vers une zone de concentration maximale, le foyer. La nécessité de mobiliser la parabole selon deux axes de rotation pour assurer la poursuite de la course diurne du soleil entraîne une limitation de la dimension unitaire de ce type d'installation. Le plus grand prototype réalisé à ce jour atteint 400 m². La plupart des paraboles mobiles se situe dans la fourchette 50 à 100 m². Outre le système de déplacement, qui doit être à la fois précis et robuste, une difficulté majeure au plan technologique est de fabriquer un miroir parabolique. Des miroirs paraboliques unitaires en verre poli

et argenté sont utilisés pour des diamètres inférieurs à 2 m. Pour de plus grands diamètres, d'autres solutions sont adoptées, moins coûteuses et surtout plus légères. Un film métallique tendu sur un tambour dans lequel est maintenu un vide partiel prend une forme concave proche de la parabole. Cette solution a été testée, mais abandonnée en raison de sa trop grande fragilité et de sa médiocre longévité. On lui préfère aujourd'hui la solution de la coque en matière plastique ou en matériau composite de type fibres de verre et résine polymère, sur laquelle sont collés des miroirs élémentaires déformables en verre mince, d'épaisseur inférieure au millimètre. La coque peut fort bien être constituée de plusieurs segments identiques assemblés à la façon d'une corolle. Le facteur de concentration moyen obtenu au foyer d'une parabole dépasse le millier, ce qui permet de produire de la chaleur à très haute température, typiquement 700 °C et plus. La conversion en électricité est réalisée par un cycle thermodynamique à très haut rendement du fait de la température élevée de la source chaude. Dans la gamme de puissance concernée, c'est le cycle Stirling, qui recueille les faveurs des concepteurs des systèmes parabole-moteur. Le gaz de travail du cycle est aussi le fluide de transfert qui collecte les calories dans le récepteur solaire. On utilise couramment de l'hélium ou de l'hydrogène. Ce dernier est plus performant au plan thermique mais plus délicat à mettre en œuvre en raison de sa propension à fuir et du niveau de risque lié à son utilisation. Le moteur est placé au foyer de la parabole, de même que la génératrice électrique. Un circuit d'eau refroidit le cycle et évacue vers l'air ambiant les calories à basse température au moyen d'un radiateur-convecteur. Le module parabole-moteur ainsi constitué est un convertisseur énergie solaire-électricité qui opère au fil du soleil. Le seuil minimal d'ensoleillement exploitable est d'environ 300 W/m² pour le module Eurodish de 10 kW du constructeur allemand SBP-SOLO.

On tient là une solution séduisante et très efficace : le rendement instantané de conversion énergie solaire-électricité est supérieur à 22 % (29 % pour le module de 25 kW du constructeur américain SES (Stirling Energy Systems)), ce qui est excellent. Le coût spécifique d'investissement encore élevé (14 €/W pour le module Eurodish) sera réduit au moins de moitié lorsqu'un marché existera pour ce type d'installation et qu'une fabrication de série pourra être lancée. Ces

machines subissent de nombreux cycles de démarrage/arrêt et les composants du récepteur sont soumis à des chocs thermiques violents. Le coût d'exploitation et de maintenance est élevé. Les systèmes parabole-moteur sont destinés en premier lieu à la production décentralisée d'électricité. La recherche de solutions hybrides dans lesquelles une source de chaleur non intermittente (fossile ou biomasse, par exemple) prend le relais de la source solaire lorsque l'ensoleillement disparaît est un enjeu capital pour conquérir des parts de marché. La cogénération décentralisée électricité/chaleur ou froid, tout à fait envisageable avec ce type de machine, ouvre également des perspectives de pénétration de marché ciblé. Toutefois, la production centralisée d'électricité n'est pas totalement exclue du champ d'application. La modularité de ces systèmes permet d'envisager une montée en puissance progressive de la capacité installée sur un même site, en étalant les investissements sur une longue durée ce qui facilite le financement.

1.5.2.2 Concentrateur à tour

Pour échapper aux limitations de taille, donc de puissance, rencontrées avec la parabole sans trop céder aux performances en termes de concentration, on développe la surface collectrice réfléchissante en disposant au sol des miroirs élémentaires mobiles appelés héliostats. Ces héliostats sont animés d'un mouvement selon deux axes. Ils poursuivent la course du soleil et dirigent le rayonnement solaire vers un point unique qui est le foyer de l'installation, placé au sommet d'une tour. On parle alors de tour à récepteur central CRS. Les héliostats actuels ont une surface située entre 50 m² et 120 m². Ils sont légèrement focalisant ; leur focale est voisine de leur distance au récepteur solaire.

Aux latitudes moyennes la tour est placée en bordure du champ d'héliostats (au Nord ou au Sud selon l'hémisphère terrestre). Aux faibles latitudes (< 35°), elle occupe une position plus centrale. Les schémas de la figure 2.2 illustrent ces deux configurations. L'ombre portée de la tour sur le champ de miroirs affecte directement l'efficacité du concentrateur. Les réalisations pratiques sont des constructions en béton ou en poutres métalliques.

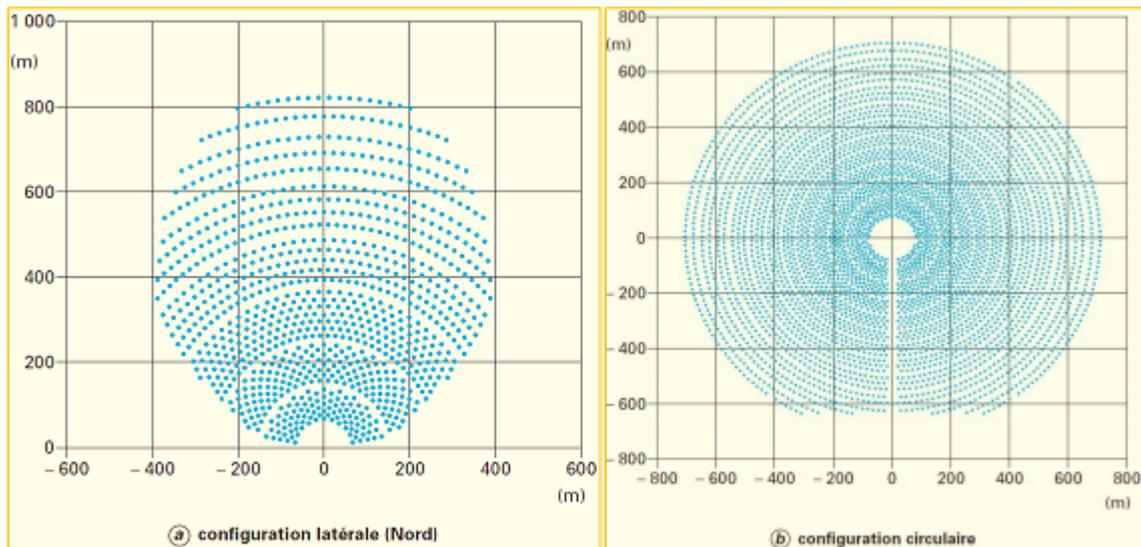


Figure 1.11 Exemples de configurations de champ d'héliostat pour les concentrateurs à tour [8]

L'optimisation de la distribution des héliostats et de la hauteur de tour résulte de calculs optiques qui prennent en compte l'ensemble des causes de pertes. Les pertes optiques sont dues aux effets d'ombre et de blocage, à l'effet cosinus et, bien entendu, à la réflectivité des miroirs.

Il faut y ajouter la perte liée à la disponibilité des héliostats, à l'absorption atmosphérique, et enfin au débordement de la tache focale à l'entrée du récepteur. L'efficacité optique d'un champ d'héliostats dépend de la position au soleil. En pratique, les valeurs extrêmes varient de 40 % aux grands angles à plus de 80 % aux équinoxes à midi. On peut situer une valeur moyenne représentative des installations actuelles autour de 70%.

Les pertes thermiques du récepteur sont issues de la réflexion du rayonnement solaire, du rayonnement émis par la surface chaude de l'absorbeur à T_{rec} et des pertes par conduction et convection vers l'air libre.

La puissance transférée au fluide caloporteur, ou puissance utile P_{utile} , est proportionnelle à la surface de l'absorbeur S_{abs} , au coefficient d'échange avec le fluide h_{xc} , et à l'écart de température entre le récepteur à T_{rec} et le fluide à T_{fl} :

On néglige les pertes par conduction et convection. Les courbes de la figure 2.3 illustrent dans ce cas l'influence de la surface de l'absorbeur sur les performances du récepteur. Dans la gamme de concentration inférieure à 500, correspondant ici à

une surface d'absorbeur supérieure à 150 m^2 , le rendement du récepteur varie très peu autour de son maximum. Pour des concentrations supérieures, le rendement chute rapidement. La température du récepteur augmente avec la concentration. Dans la pratique, on choisit la surface d'absorbeur qui permet de ne pas dépasser la température critique admissible pour le récepteur, et qui demeure assez bon marché. Cette limite de température dépend en premier lieu de la nature des matériaux utilisés.

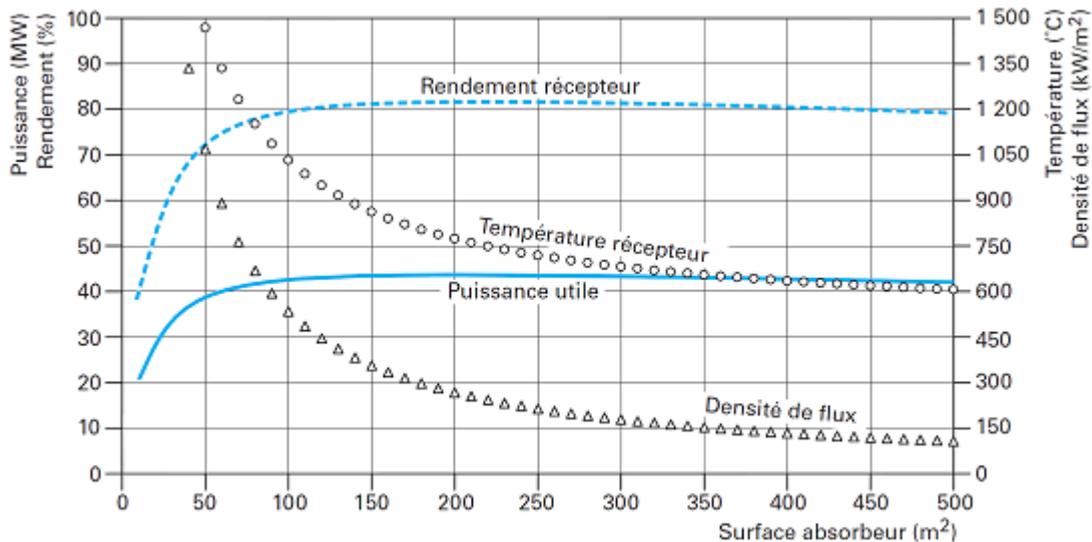


Figure 1.12 Exemple de courbes de performances d'un récepteur solaire central champ solaire $75\,000 \text{ m}^2$, ensoleillement 950 W.m^{-2} , température de fluide $500 \text{ }^{\circ}\text{C}$, coefficient d'échange à la paroi $800 \text{ W.m}^{-2}.\text{K}$ [8]

La technologie de l'absorbeur, la nature et l'écoulement du fluide caloporteur utilisé conditionnent le coefficient d'échange à la paroi h_{xc} . Un coefficient plus élevé permet de réduire la surface de l'absorbeur.

Les bonnes performances des centrales à tour dans une gamme de puissance élevée les destinent à la production centralisée d'électricité.

Les composants coûteux sont les héliostats et le récepteur central placé au foyer. La baisse du coût des héliostats est recherchée dans l'accroissement de la taille unitaire. Une piste intéressante est celle des héliostats couplés mécaniquement, qui conduit à des économies sur la motorisation. La précision de la visée des héliostats, l'absorption du rayonnement entre un héliostat et le foyer et la hauteur de la

tour sont les trois facteurs limitant la dimension de l'installation. Une surface totale de champ d'héliostats de 200 000 m² constitue une limite vraisemblable. Pour les systèmes de très forte puissance, le concept de réflecteur secondaire placé au sommet de tour pour renvoyer le faisceau vers le pied de tour est sérieusement envisagé. Citons également les études, notamment en Australie, sur des concepts de concentrateurs constitués de mini-tours (hauteur 10 à 20 m) réparties dans un champ d'héliostats de petites dimensions et bon marché.

1.5.2.3 Concentrateur cylindro-parabolique

On présente ici une solution un peu plus économique que le concentrateur à tour, avec des performances qui demeurent tout à fait honorables. Sa simplicité, son coût relativement modéré et la fiabilité déjà acquise placent ce système en meilleure position pour un déploiement immédiat de la filière.

Le miroir concentrateur est un cylindre de section parabolique. Il ne comporte qu'une seule direction de courbure ; sa fabrication et sa mise en forme sont donc considérablement simplifiées. Installé le long de l'axe Nord-Sud, le miroir est animé d'un seul mouvement de rotation qui le fait basculer d'Est en Ouest de façon à être éclairé par le rayonnement solaire selon l'axe optique de la parabole. La concentration est obtenue sur une ligne, matérialisée par le récepteur tubulaire dans lequel circule le fluide de transfert.

Le capteur ainsi réalisé est un système modulaire simple à installer, qui offre une grande souplesse d'utilisation (figure 2.4). Le récepteur est solidaire du miroir ; des raccords souples permettent de connecter les modules en série. On peut installer une très grande puissance en reliant de nombreux modules les uns aux autres. La limitation vient des pertes thermiques et des pertes de charge qui augmentent avec la longueur de tuyauteries nécessaires pour véhiculer le fluide de transfert dans le champ solaire. On optimise le nombre de modules placés en série et en parallèle de façon à minimiser les coûts de pompage et les pertes thermiques. Les progrès à attendre des travaux de recherche concernent la baisse du coût des structures support des miroirs et quelques points de rendement de conversion au niveau du récepteur par l'amélioration des propriétés optiques des tubes et au niveau du cycle par l'élévation de la température de sortie du champ solaire.[8]

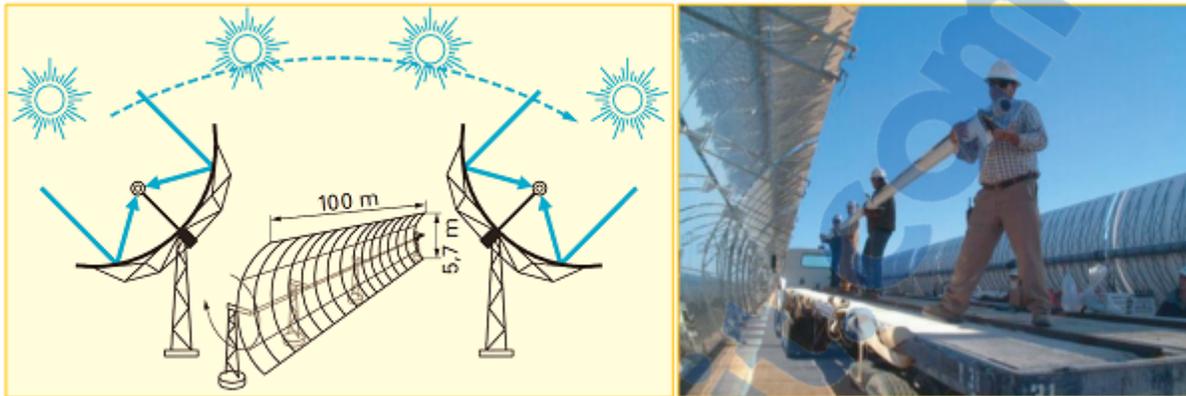


Figure 1.13 Montage d'un élément de récepteur tubulaire sur un capteur cylindro-parabolique [8]

1.5.2.4 Collecteurs linéaires à miroirs de Fresnel

Offrent une solution alternative aux concentrateurs cylindro-paraboliques. Ce système met en œuvre des miroirs plans disposés en lames parallèles qui s'inclinent par rotation de façon à éclairer un absorbeur tubulaire fixe. Plus simples, surtout meilleur marché, mais moins performants en terme de concentration, ils sont intéressants par exemple pour préchauffer le fluide de transfert. La société belge SolarMundo a contribué pendant quelque temps au développement de ce concept, mais aucune réalisation industrielle n'a vu le jour et le projet de SolarMundo est aujourd'hui abandonné. Ce concept est en revanche fortement appuyé par le gouvernement Australien et une équipe de l'Université de Sydney en assure la promotion. L'application visée consiste à installer un champ de capteurs CLFR (Compact Linear Fresnel Reflector) pour préchauffer partiellement l'eau du cycle de Rankine de la centrale au charbon à cycle combiné Lidell Power Station (NSW). Environ 500 kWe de capteurs fabriqués par la société SHP (Solar Heat and Power Pty Ltd (Australie)) sont déjà installés sur le site, qui accueillera une capacité solaire totale de 36 MWe .

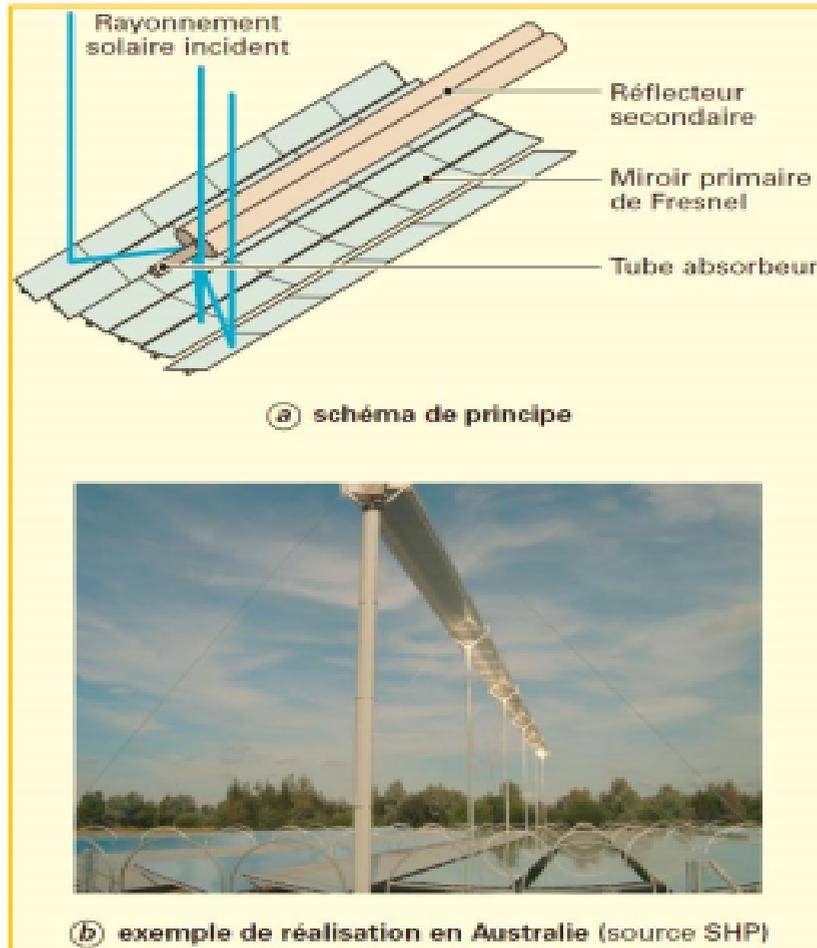


Figure 1.14 Concentrateur linéaire à miroirs de Fresnel [8]

CONCLUSION

L'énergie solaire est souvent considérée comme l'énergie de l'avenir : elle est potentiellement inépuisable à échelle humaine, renouvelable et propre. L'enjeu économique est de taille dans un contexte où les prix du charbon, du gaz naturel et du pétrole sont amenés à augmenter avec la diminution irrémédiable à long terme de ces ressources. Ce fort potentiel couplé à la nécessité de réduire les gaz à effet de serre font de l'énergie solaire un axe de développement privilégié aujourd'hui.

Chapitre 2 :

étude théorique sur le Mur trombe et les cavités

Introduction

Un bâtiment définit un espace dont l'ambiance doit être maîtrisée, de telle manière à être confortable pour l'utilisateur. Ce confort intègre les aspects thermiques, acoustiques, lumineux... Afin de maîtriser l'ambiance thermique, il est nécessaire de gérer les différents échanges de chaleur pour lesquels l'environnement extérieur représente une sollicitation par les variations de températures, d'apports solaires, de vitesse et orientation de vent.

L'objectif de l'architecture bioclimatique est d'assurer le maintien d'une ambiance confortable par des solutions qui impactent le moins l'environnement. Le rapport du bâtiment avec l'ambiance extérieure est alors complexe, ce dernier pouvant avoir un impact positif ou négatif. En hiver, en l'absence de soleil, il s'agit de limiter les pertes, ce qui se fait notamment par l'isolation de l'enveloppe. Le bâtiment doit aussi pouvoir bénéficier des apports solaires, quand ils sont possibles. En été, afin de limiter les surchauffes, l'objectif est de limiter les apports, et d'évacuer la chaleur interne.

L'isolation thermique de l'enveloppe est un point essentiel de la conception de bâtiments performants. Les travaux de recherche sur la thermique du bâtiment engagés après le choc pétrolier de 1973 et l'accroissement du coût de l'énergie, révèlent l'importance de l'isolation thermique des bâtiments dans la maîtrise de la consommation d'énergie. Cette isolation permet de limiter les pertes par l'enveloppe l'hiver, et de limiter les apports l'été. Il est montré que l'isolation est plus performante si elle est placée en périphérie extérieure du bâtiment plutôt qu'à l'intérieur. Différents avantages sont associés à l'isolation thermique par l'extérieur (ITE). La limitation des ponts thermiques permet une meilleure isolation de l'enveloppe, et ainsi la réduction des pertes. L'inertie thermique intérieure du bâtiment est alors plus élevée limitant les variations de températures, et assurant notamment un meilleur confort d'été. Dans le cas de rénovation, elle permet de ne pas modifier la surface habitable et de limiter l'impact des travaux sur l'activité du bâtiment. Enfin, quand l'isolation est placée du côté extérieure, elle augmente la durabilité de l'enveloppe, les variations de températures étant plus faibles, les défauts liés à l'humidité et au gel plus rares.

Les différents systèmes solaires passifs de façade

a) Le mur Trombe-Michel, solution solaire de chauffage passif :

L'idée du mur Trombe-Michel, du nom de ses inventeurs, Félix Trombe et Jacques Michel, a été proposée dans les années 1950. Elle repose sur l'exploitation du phénomène de tirage thermique pour chauffer une pièce. Il s'agit de capter l'énergie solaire incidente et ensuite de la redistribuer dans le bâtiment associé.

Le mur Trombe est constitué d'une paroi vitrée placée devant un mur épais à forte inertie et faiblement isolé dont la face extérieure est souvent peinte en noir. Des clapets en parties hautes et basses permettent de fermer les entrées et sorties d'air et d'ainsi de possiblement complètement fermer la lame d'air. La figure 2.1 montre un exemple de mur Trombe.



Figure 2.1 : Mur Trombe du parc national Zion, Utah Etats Unis, étudié par Torcellini et Pless (2004) [9]

Les études sur les performances du mur trombe ont commencé à la fin des années 1960. Elles se sont notamment basées sur le cas de l'immeuble de démonstration construit à Odeillo par Félix Trombe, ingénieur du CNRS et Jacques Michel, architecte.

Akbari et Borgers (1979) étudient la convection naturelle laminaire qui prend place pour un cas de mur trombe en 1979, avant d'en étudier le caractère turbulent (1984) qui se développe à partir d'une certaine hauteur.

Burek et Habeb (1997) évaluent le débit de l'écoulement de l'air dans un mur trombe en fonction de différents paramètres. Il trouve que l'épaisseur de la lame d'air n'a pas d'impact sur l'efficacité.

Torcellini et Pless (2004) évaluent la performance d'un mur trombe installé sur une petite maison dans l'Utah, aux Etats Unis. La puissance maximale atteinte est de 89 W/m², et l'efficacité moyenne, définie comme le rapport entre la chaleur donnée au bâtiment, et l'énergie solaire incidente est de 13 %.

Un travail de compilation de différentes études sur le mur Trombe, présentant un certain nombre d'installation de mur Trombe et leurs performances a été réalisée par Saadatian *et al.* (2012). Ils en concluent les enjeux et les opportunités associés au développement de ce type de système solaire passif.



b) **Le SolarWall :**

En 1975, le brevet pour le « SolarWall system » est déposé par Schoenfelder. Le SolarWall est un collecteur métallique qui permet de « capter l'énergie solaire et de la convertir en chaleur pour le chauffage » (figure 2.2). La plaque extérieure peut être opaque et alors le plus souvent métallique et percée. Le rayonnement solaire incident sur cette plaque métallique extérieure, induit un échauffement de l'air situé derrière et ainsi un mouvement de convection naturelle.

Plusieurs évolutions du SolarWall ont abouti à des systèmes de ventilation mécanique pour favoriser l'écoulement ascendant dans la lame d'air. L'entreprise Solarwall commercialise cette solution, dont on retrouve quelques cas d'installation en France, le plus souvent sur des bâtiments ayant de grandes façades opaques comme des supermarchés.



Figure 2.2 : Illustration du SolarWall [9]

Leon et Kumar (2007), présentent un modèle de SolarWall et analysent les performances en faisant notamment varier la porosité et le coefficient d'absorption du collecteur métallique. L'application envisagée est le séchage de produits alimentaires en Asie, comme alternative aux collecteurs en verre, au prix plus élevé.

c) Les cheminées solaires, solution de rafraîchissement passive par ventilation naturelle

Les cheminées solaires sont un autre type de système s'appuyant sur le phénomène de tirage thermique. L'objectif de ces systèmes est de favoriser la ventilation naturelle en été, c'est-à-dire le renouvellement d'air et le rafraîchissement du bâtiment sans assistance mécanique. L'entrée d'air se fait vers l'intérieur, et la sortie vers l'extérieur. la figure 2.3 illustre un cas de cheminée solaire placé sur la toiture.

En été, en présence d'apports solaires, la chaleur absorbée derrière le vitrage induit un écoulement de l'air intérieur du bâtiment vers l'extérieur, la différence de pression d'air dans le bâtiment est équilibré par une entrée d'air qui se fait en un autre point, le plus souvent en partie basse, et en un point « frais ».



Figure 2.3 : Cheminée solaire du lycée français de Damas, en Syrie par Yves Lion [9]

Les géométries de ces solutions sont variées, les capteurs solaires peuvent être inclinés. Hamdy et Fikry (1998) réalisent une étude numérique pour des solutions de cheminée solaire inclinées, et conclut qu'un angle de 60° maximise le débit et ainsi la performance de la ventilation naturelle pour la région étudiée (Egypte).

Bansal *et al.* (1993) proposent un modèle pour une cheminée solaire destinée à améliorer la ventilation naturelle d'un bâtiment. Hirunlabh *et al.* (1999) étudient l'efficacité d'un mur solaire métallique pour la ventilation naturelle d'une maison, et déterminent l'épaisseur de lame d'air qui maximise le débit d'évacuation d'air. Ong (2003) développe un modèle mathématique de cheminée solaire pour étudier la performance en fonction du flux solaire incident pour des épaisseurs de lame d'air de 10, 20 et 30 cm. Les vitesses d'air mesurées sont entre 0,25 et 0,4 m/s.

Le débit de renouvellement d'air de $150 \text{ m}^3/\text{h}$ a été mesuré par Mathur *et al.*, (2006), pour une cheminée solaire verticale de 1m de haut, une épaisseur de lame d'air de 0,35m, un flux d'énergie solaire incident de 700 W/m^2 .

d) Les bardages

Les bardages sont des revêtements de mur extérieur. Le bois est souvent utilisé, mais ils peuvent aussi être métalliques ou en terre cuite. L'élément de bardage est posé sur des liteaux, qui délimitent alors une lame d'air. Plusieurs configurations de liteaux sont possibles : posés à l'horizontal, vertical ou croisés.

Dans la volonté d'améliorer la modélisation des bâtiments, la prise en compte des phénomènes de transfert au niveau de l'enveloppe s'étend au transport d'humidité et d'air (constat de départ du projet ANR PACIBA, 2006). le bardage est une solution pertinente pour le séchage d'un isolant placé à l'extérieur d'un mur et donc pour éviter la dégradation des performances de l'isolant par l'humidité. Ainsi au niveau de l'enveloppe, le domaine d'étude s'étend au possible bardage placé devant la paroi. Cette amélioration de la modélisation permet alors une meilleure conception de ces systèmes, et une meilleure prédiction de leurs impacts sur le bâtiment. Ce point est une des motivations des travaux sur les bardages.

La réglementation thermique française propose de modéliser la présence d'un bardage par l'augmentation de la résistance superficielle extérieure de la paroi (de 0,05 à 0,13 $\text{m}^2\cdot\text{K}/\text{W}$) qui est munie d'un bardage. Cette rapide modélisation est justifiée par le fait que le bardage sépare le mur de l'environnement extérieur et le place ainsi dans la même configuration que la face intérieure de la paroi.



Figure 2.4 : Exemple des maisons du quartier Arroussets à Bayonne qui intègrent un bardage pin maritime ventilé devant une isolation par l'extérieur [9]

Straube et Finch (2009) ont réalisé une chronologie des différents travaux sur l'efficacité du séchage des bardages. Mayer et Künzle (1983) ont présenté des résultats sur l'efficacité de la convection naturelle derrière bardage pour le séchage. Des séries de mesures de vitesse d'air dans la lame d'air derrière de grands panneaux de façades ventilées sur un bâtiment de trois étages ont été réalisées. Les deux forces qui agissent sur le débit de renouvellement d'air sont la différence de pression due au vent et l'écoulement induit par l'énergie solaire absorbée. Des vitesses d'air ont été mesurées entre 0,05 et 0,15 m/s lorsque la vitesse du vent était de 1 à 3 m/s. Ils ont montré que la direction du vent influence plus la vitesse d'écoulement que la vitesse du vent. De ces expérimentations, ils ont conclu qu'une épaisseur de lame d'air de 20 mm était suffisante pour assurer le séchage.

Falk *et al.* (2012) ont réalisé des mesures sur un mur orienté sud pour bardages fixés sur liteaux horizontaux ou verticaux. Les liteaux horizontaux empêchent l'effet de tirage vertical. Le renouvellement d'air est alors diminué de près de 70%, et repose sur l'effet du vent. Dans le cas de liteaux verticaux, le débit associé au vent est irrégulier et ne dépend pas de l'angle d'incidence du vent. Quand l'écoulement ascendant induit par le rayonnement solaire est bien développé, l'influence du vent est alors nulle, ce qui rend plus facile la prédiction du débit de renouvellement d'air.

Labat *et al.*, (2012) considèrent le cas d'un bardage bois posé sur des liteaux verticaux. Le bardage est ajouré, un espace de 8mm est laissé entre les lames. L'écoulement est étudié notamment par CFD (*Computational Fluid Dynamics* – Mécanique des Fluides Numérique), et une corrélation établie pour prédire l'évolution de la vitesse d'écoulement ascendant dans la lame d'air en fonction de la hauteur. Cette corrélation pour l'écoulement derrière le bardage est ensuite intégrée dans un modèle à l'échelle du bâtiment, fournissant de bons résultats.

De ces travaux, on remarque que la plupart se concentre sur une étude fine de l'écoulement dans la lame d'air mais étudie peu l'impact que le bardage a sur le comportement du bâtiment. Nous n'avons pas trouvé d'études proposant une modélisation simple des bardages permettant leur intégration dans un modèle de simulation thermique dynamique.

Il faut aussi remarquer que différents auteurs relèvent l'influence du vent sur l'écoulement, mais ne sont pas en accord quant à son influence.

e) Les façades double peaux, pour chauffage solaire passif et ventilation

Une façade double peau est une façade simple traditionnelle doublée à l'extérieur par une façade essentiellement vitrée, comme on peut le voir sur la figure 2.5. L'objectif d'une telle façade est multiple : diminuer les déperditions thermiques par l'enveloppe, créer une isolation phonique, apporter un effet architectural. La double peau permet alors par effet de serre de générer un écoulement, qui peut être utilisé soit pour chauffer le bâtiment (en hiver) soit pour le rafraîchissement du bâtiment par ventilation naturelle (en été).

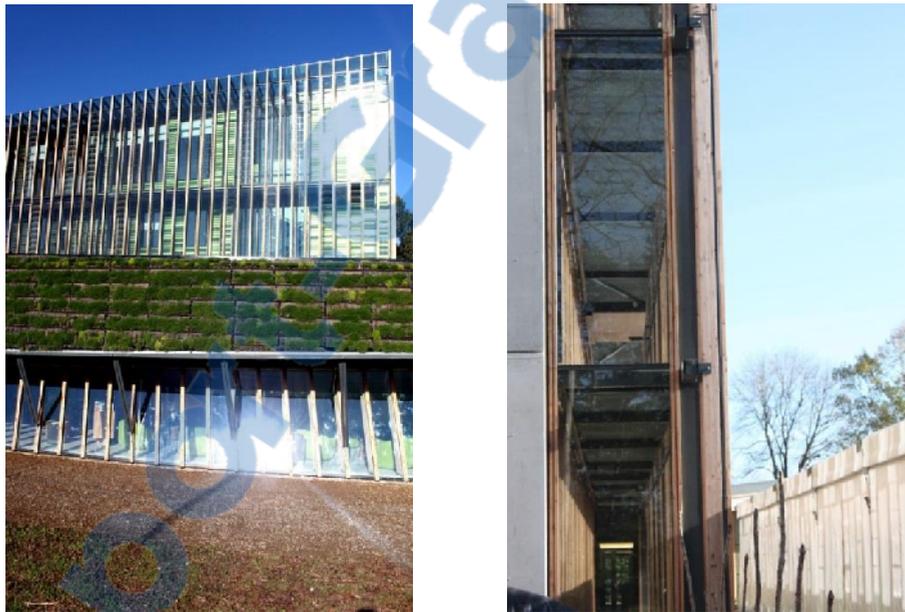


Figure 2.5 : Illustration d'une façade double peau : le bâtiment de l'Office 64 à Bayonne. Architecte P. Arotcharen. [9]

La zone double peau est généralement une zone inoccupée qui se trouve à environ 1 m de la façade du bâtiment. Cette distance entre les deux peaux, visible sur la figure 2.5, se justifie notamment par la nécessité d'accès pour l'entretien des façades.

Il faut remarquer que les ouvertures de la lame d'air peuvent être multiples, et être aussi bien orientées vers l'intérieur que l'extérieur.

Tout d'abord, la lame d'air peut être complètement fermée. Ce peut être le cas en hiver, de telle manière à bénéficier des apports transmis par les deux couches de vitrage vers le bâtiment, et de limiter les pertes par conduction de la température élevée dans la double peau.

En hiver, l'ouverture de fenêtre de l'enveloppe structurelle vers la double peau permet le mélange de l'air du bâtiment avec l'air de la double peau en présence d'apports solaires potentiels.

En été, de manière à éviter les apports de chaleur solaire, on favorise l'évacuation de la chaleur par transport convectif en ouvrant vers l'extérieur en parties basse et haute.

Hensen *et al.* (2002) étudient la pertinence de façades double peaux et particulièrement le fonctionnement en l'été, pour la construction de nouveaux bâtiments tertiaires. Ils utilisent deux types d'approche de modélisation, la première utilisant un réseau de bilans d'énergie et de masse, et la deuxième basée sur des simulations par CFD. Ils concluent que pour l'aide à la conception la première est la plus adaptée car plus rapide à mettre en œuvre mais que l'approche CFD peut être utile pour des études plus avancées.

Gratia et De Herde (2004) utilisent le logiciel TAS pour étudier l'impact d'une telle double peau sur le comportement thermique du bâtiment, et notamment évaluer l'efficacité de la ventilation naturelle nocturne comme solution de rafraîchissement.

L'application des modèles s'est élargie par la suite, Stec *et al.* (2005) proposent un modèle de double peau prenant en compte l'impact de plantes placées entre les deux peaux. Dans une autre étude, Stec *et al.* (2005) travaillent sur l'intégration de la double peau avec les systèmes HVAC (Chauffage, Ventilation, Climatisation), du bâtiment associé. Ainsi, les réductions de consommation d'énergie générées grâce à la double peau peuvent contrebalancer les coûts énergétiques de sa mise en œuvre.

f) Les plantes grimpantes comme protections solaires

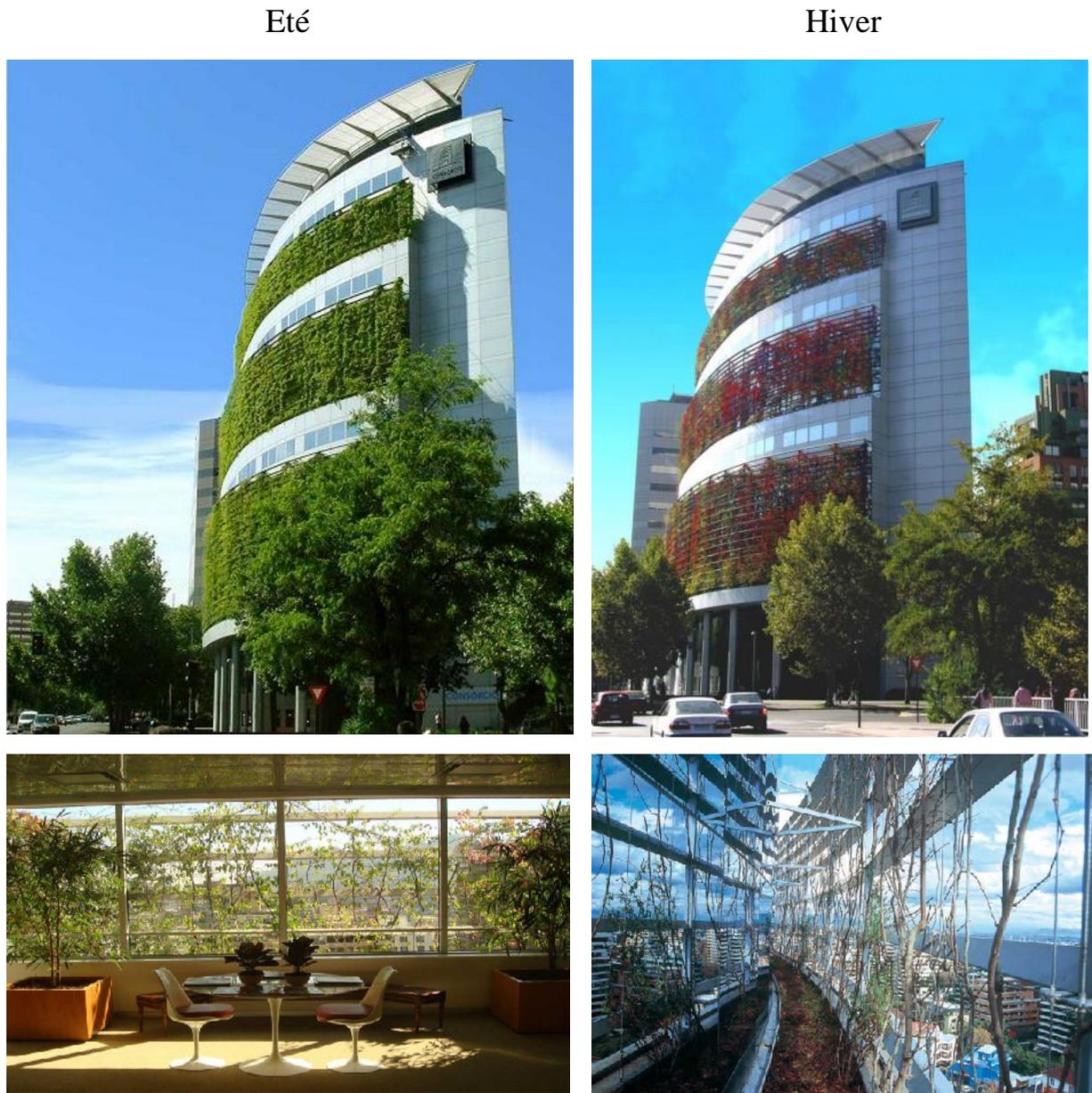


Figure 2.6 : Bâtiment Consorcio à Santiago au Chili avec une façade végétalisée, de l'architecte Enrique Brown. Vue extérieure et intérieure pour les saisons été et hiver. [9]

La végétation autour d'un bâtiment a non seulement un impact au niveau psychologique et visuel mais elle améliore également les conditions microclimatiques. Les plantes grimpantes caduques voient naturellement leur facteur solaire évoluer pendant l'année. Il est faible en hiver, quand il y a besoin d'apports radiatifs, et élevé l'été quand il faut les maîtriser. Ce sont donc des protections solaires pertinentes.

L'utilisation des plantes comme protections solaires peut prendre deux formes. Les « living wall » sont des systèmes directement posés sur un mur, qui accueille des plantes variées qui sont alors arrosées. Les « green façades » sont des plantes grimpantes sur des supports dédiés devant des façades vitrées, comme on peut le voir sur l'exemple du bâtiment Consorcio d'Enrique Brown à Santiago au Chili (figure 2.6).

Hoyano (1988), étudie un écran végétal en vigne caduque devant une véranda et une vigne verte persistante devant un mur opaque. Il explique que cette recherche est motivée par une attente des architectes. Il évalue alors l'impact de ces solutions sur le bâtiment. Holm (1989) reprend la quantification des différentes composantes du bilan énergétique au niveau d'une feuille réalisée par Minke et Witter (1983) et analyse les propriétés radiatives des feuilles de vigne vierge.

Ip *et al.* (2010) étudient l'impact de plantes grimpantes utilisées comme protections solaires devant une paroi vitrée. Le traitement d'image est utilisé pour déterminer le LAI (Leaf Area Index) c'est à dire le taux de recouvrement des feuilles, au cours de l'année. Celui-ci est utilisé pour établir une fonction qui traduit la transparence du système au cours de l'année, à la façon d'un facteur solaire dynamique.

Un modèle détaillé de l'ensemble des échanges de chaleur (radiatif, convectif, enthalpie latente de changement d'état) prenant place est proposé par Susorova *et al.* (2013) dans le cas de plantes grimpantes sur un mur opaque en fonction, et validé par comparaison avec des mesures sur une durée d'une semaine. Une comparaison est faite entre un mur nu et un mur avec des plantes grimpantes pour des journées ensoleillées. La température de la surface extérieure du mur peut être réduite jusqu'à 13°C, et la résistance thermique équivalente des plantes est alors de 0,71 W/m².K.[9]

2.1. Etude Théorique sur le mur de Trombe

Le mur Trombe est un exemple des techniques existantes permettant de mettre « passivement » à profit l'énergie solaire. Ce type de mur, parfois utilisé dans le bâtiment, a été conçu par le professeur Félix Trombe et l'architecte Jacques Michel dans les années 60, reprenant un concept breveté de la fin du XIXe siècle. C'est un mur capteur composé d'un bloc de matière à forte inertie (béton, pierre, etc.) qui accumule le rayonnement solaire du jour et le restitue pendant la nuit. Devant cette paroi, on place une vitre pour créer un effet de serre afin de chauffer l'air. [11]

2.1.1 Le fonctionnement d'un mur Trombe

Le fonctionnement du mur Trombe est différencié en été et en hiver. En hiver, le rayonnement solaire incident est absorbé par la face extérieure du mur, l'effet de serre permet l'accumulation de chaleur. L'air chauffé en se dilatant induit une circulation naturelle depuis l'ouverture basse vers l'ouverture haute. Cette circulation permet de récupérer la chaleur stockée et ainsi de chauffer passivement la pièce associée.

L'hiver en l'absence de rayonnement incident les clapets bas et hauts doivent être fermés de telle manière à limiter la convection et ainsi les transferts de chaleur.

L'air circule de bas en haut par un système de clapets.

L'air froid sort de la maison, se réchauffe en montant au contact de la vitre pour rentrer réchauffer dans la pièce où il se refroidit, redescend pour reprendre un cycle.

Pour éviter que l'air ne se refroidisse trop vite lorsque le rayonnement solaire n'est pas suffisant, les clapets se ferment :

- lorsque les clapets sont fermés, la chaleur accumulée dans le mur continue d'être restituée dans l'habitation durant quelques heures,
- il est préférable d'automatiser le système de fermeture et d'ouverture des clapets et de prévoir un chauffage d'appoint. [12]

En été, en présence de soleil, les clapets sont fermés pour limiter les apports de chaleur.



FIGURE 2.7 : maison Félix Trombe à Odeillo (Pyrénées-Orientales) 1962 [11]

2.1.2 *Le principe des murs capteurs accumulateurs*

Les murs capteurs accumulateurs, qui sont en général des portions de mur orienté au Sud, sont composés d'une vitre placée devant un élément de maçonnerie lourde (mur en brique ou en béton) de couleur sombre.

La vitre permet de capter et amplifier le rayonnement solaire, sur le même principe qu'une serre. Cette énergie thermique pourra ensuite chauffer le mur placé à l'intérieur. Comme il s'agit d'un mur « lourd » et de couleur sombre, la chaleur sera absorbée, accumulée puis rayonnée à l'intérieur du bâtiment avec un certain déphasage qui dépend de la nature du mur. [11]

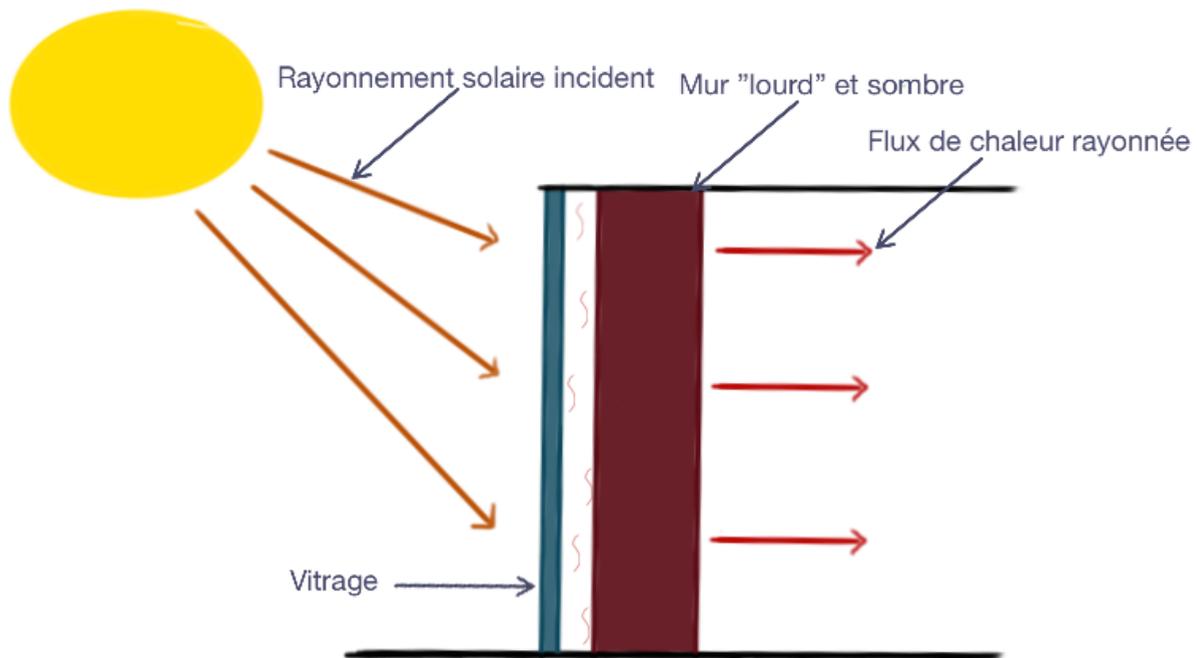


Figure 2.8 : le principe des murs capteurs accumulateurs [11]

2.1.3 La spécificité du mur Trombe

Le mur Trombe se distingue des murs capteurs accumulateurs classiques.

En effet, les murs capteurs standards diffusent principalement la chaleur par rayonnement, comme un radiateur.

Les murs développés par M. Trombe, eux, permettent la circulation de l'air entre la vitre et le mur pendant la journée. La circulation de l'air entre la vitre et le mur est naturelle : l'air entre par le bas du mur, puis se réchauffe grâce au rayonnement solaire. L'air ainsi réchauffé devient moins dense et monte donc vers la sortie de l'aération. Le chauffage a donc lieu par « convection » c'est-à-dire par le chauffage et le déplacement de l'air.

Pour éviter que le système ne marche à l'envers pendant la nuit ou en l'absence de soleil, et que de l'air chaud ne se refroidisse au contact de la vitre, l'aération est contrôlée par des clapets anti-retour dans le cas le plus simple ou par des systèmes de ventilation automatisés dans les systèmes les plus complexes et autonomes.

En été, les gains solaires ne sont pas nécessaires pour le chauffage de la maison, au contraire, ils peuvent même être indésirables. C'est pourquoi l'inventeur a prévu un store ou volet de couleur claire, à déployer en cas de surchauffe pour ne pas que le mur ne se charge en chaleur. Dans ce cas, le mur « lourd » servira d'isolant et participera à conserver la fraîcheur de la maison.

Le volet peut également être baissé durant la nuit ou les journées sans soleil pour ne pas que le mur ne perde sa chaleur vers l'extérieur.[11]

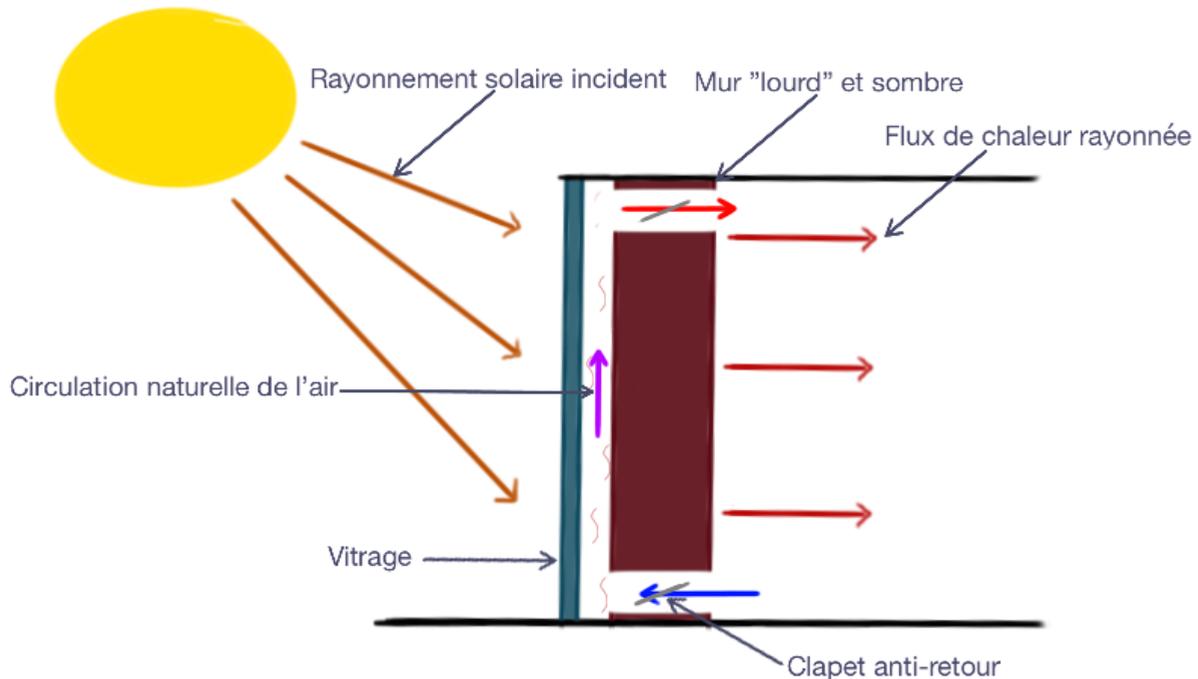


Figure 2.9 : La spécificité du mur Trombe [11]

2.1.4 La réponse du mur Trombe aux besoins de chauffage

La première maison à avoir bénéficié d'un mur Trombe est celle de M. Trombe lui même. Dans celle-ci, construite en 1962, la quasi-totalité de la façade Sud est constituée d'un tel mur, qui permet d'assurer 70% des besoins en chauffage de la maison.

Avec les progrès techniques au niveau des vitrages et des systèmes d'automatisation, le rendement d'une telle installation est de 30 à 40% des apports solaires. La capacité du système à combler les besoins de la maison dépendra donc fortement de l'ensoleillement de la région.

En Auvergne par exemple, pour les mois d'Hiver de Novembre à Avril, le gain par un mur Trombe de 2 m sur 2m25 est de 695 kWh. Alors que pour une baie vitrée classique même de taille, il est de seulement 565 kWh.

Enfin, comparé à d'autres systèmes de chauffage passifs, le mur Trombe possède des avantages indéniables. Le système le plus simple et le plus répandu est évidemment la baie vitrée performante. Le mur Trombe peut lui être complété pour disposer d'une plus grande liberté architecturale. Il permet aussi de bénéficier du déphasage de la chaleur et donc de chauffer la maison durant la nuit, ce que ne permet pas la baie vitrée seule.[11]

2.1.5 L'importance fondamentales des couleurs et des matières utilisés derrière les verres du mur trombe

Comme on le voit dans le schéma ci-contre, on évitera les couleurs clair ou du plâtre qui réfléchiront trop la lumière. L'ardoise ou un bois de couleur foncée seront beaucoup mieux adaptés pour absorber les rayonnements solaires.

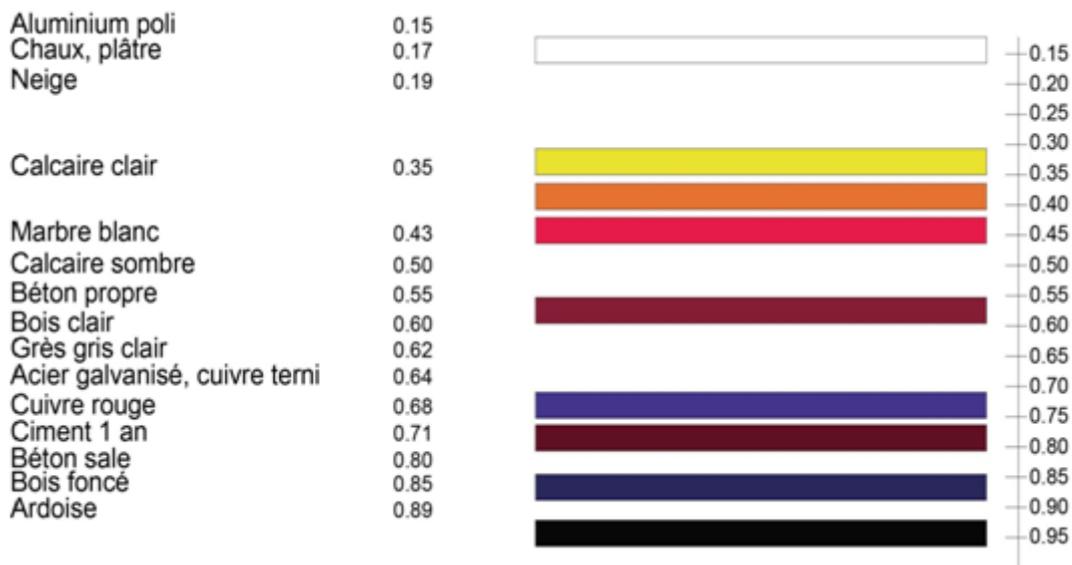


Figure 2.10 : Coefficients d'absorption pour différents matériaux et différentes couleurs [11]

2.1.6 MUR TROMBE : AVANTAGES ET INCONVÉNIENTS [11]

| AVANTAGES | INCONVÉNIENTS |
|--|---|
| Pas de réglementation. | Système assez complexe à mettre en œuvre. |
| Possibilité d'automatiser tout le système. | Peut être contraignant : fermeture et ouverture des clapets, des volets, manuellement. |
| Système passif, propre. | Nettoyage du vitrage difficile, la convection du mur favorisant la poussière si on ne prévoit pas des filtres, des clapets anti-retour et des ventilateurs. |
| | Manque d'esthétisme. |
| Réduction de la facture énergétique. | Très onéreux à mettre en place en raison de l'étude en amont et de l'installation. |

2.1.7 Opération du mur trombe

2.1.7.1 Fonctionnement de la paroi thermique en hiver :

Le concept de la paroi thermique est lié à la paroi du thermosiphon, dans lequel l'air chaud qui est entre le verre et le mur est en train de changer avec l'air généralement plus frais qui se trouve dans l'espace derrière le mur.

Le procédé qui est suivi est le suivant :

Pendant la journée, quand le soleil frappe la surface transparente ; le rayonnement solaire traverse le verre et atteint la surface sombre de la paroi. Une partie de la chaleur produite est absorbée par le mur et est rayonnée à l'intérieur, tandis que le reste est se trouver piégé dans l'espace entre le verre et le mur. Selon la deuxième loi de la thermodynamique partie de la chaleur produite est consommée sur le chauffage de l'air plus froid qui est entre le verre et le mur et l'air plus chaud à tendance à se soulever. Jusqu'à présent, le processus est similaire pour tous les types de murs solaires (masse, l'eau, les murs de Trombe).

L'innovation du mur Trombe est qu'il a été conçu avec des événements dans la partie supérieure et la partie inférieure de la paroi pour permettre à l'air de circuler. La circulation de l'air est basée sur le mouvement de l'air chaud qui sort de la ventilation supérieure à l'espace derrière le mur. En même temps, refroidisseur d'air par les événements inférieurs tend à combler le vide d'air créé.

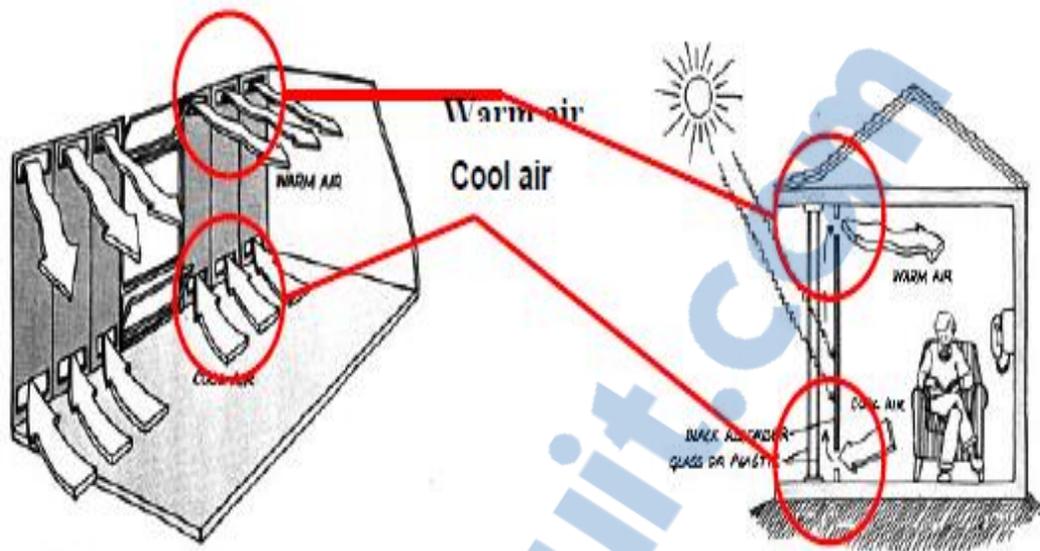


Figure 2. 11 : Opération du mur Trombe [14]

Cette disposition assure que la circulation naturelle de l'air a lieu, quand le mur commence à se réchauffer au soleil et se poursuit pendant quelques heures après que le soleil est reculé. Le temps de l'air qui continue à circuler, est lié à la quantité de rayonnement solaire que la paroi recevrait pendant le jour, les conditions climatiques, ainsi que les matériaux de construction du mur (stockage thermique). Une autre partie de cette chaleur, comme il a été mentionné ci-dessus, est transférée à l'intérieur par convection et par rayonnement vers les surfaces froides des autres murs, des planchers et des plafonds, pendant une certaine période de temps qui dépend du matériau et de l'épaisseur du mur.

Typiquement, la masse thermique de la paroi est conçu pour rayonner de la chaleur à travers la surface intérieure de la paroi de 10 à 12 heures après le coucher du soleil. Le système libère de la chaleur à l'intérieur par 3 types de transmission : circulation de la chaleur, rayonnement, conduction et convection à partir de laquelle le rayonnement est le plus important.

Des prototypes de Odeillo, les résultats des pourcentages de transmission de chaleur étaient la circulation de la chaleur $Q_t = 28\%$ Radiation $Q_r = 54\%$ conduction et convection $Q_c = 18\%$.

L'efficacité thermique moyenne du système de mur Trombe pendant l'hiver (entre Novembre- Avril) est de 30% de l'énergie solaire qui tombe sur le mur.[14]

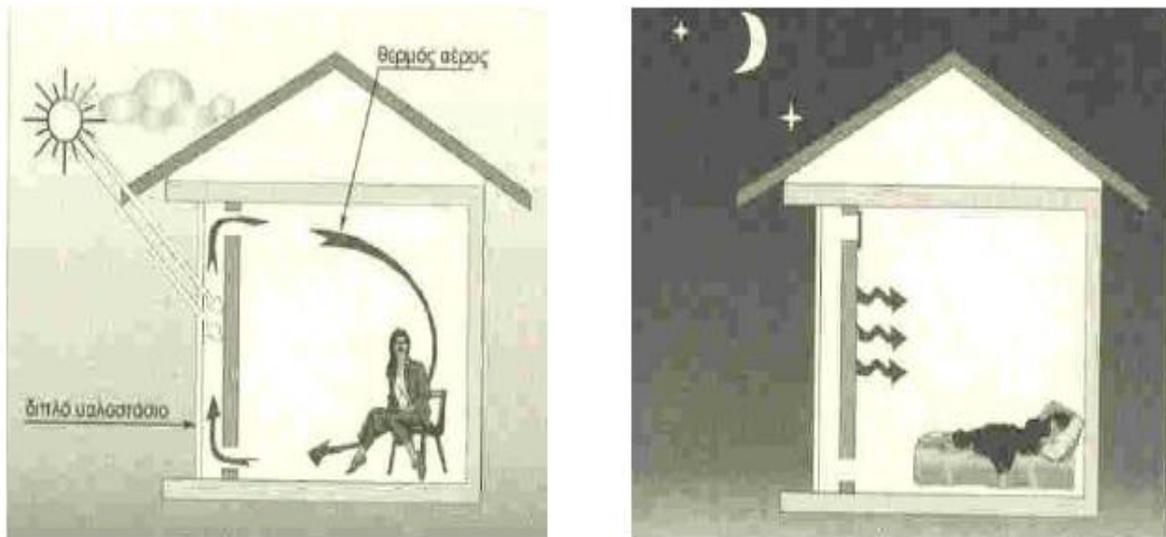


Figure 2. 12: Fonctionnement d'un mur thermique en hiver [14]

Pendant la nuit, une circulation inverse d'air se produit, ce qui signifie qu'il doit être prévu de façon à fermer les orifices de ventilation et d'empêcher la circulation inverse d'air et donc les pertes de chaleur. Une combinaison de la désactivation du système avec la fermeture des événements de la paroi, qui fonctionne maintenant comme un mur de masse, et l'isolation de la nuit, se composent des conditions indispensables pour le contrôle et la réduction des pertes de chaleur beaucoup pour la nuit que pour les jours sombres avec le manque de la radiation solaire. Pendant la nuit une circulation inverse de l'air se produit, ce qui signifie qu'il doit être prédit une façon de fermer les événements et empêcher la circulation inverse de l'air et donc les pertes de chaleur. Une combinaison de la désactivation du système avec la fermeture des événements de la paroi, qui fonctionne maintenant comme un mur de masse, et l'isolation de la nuit, se composent des conditions indispensables pour le contrôle et la réduction des pertes de chaleur beaucoup pour la nuit que pour les jours sombres avec le manque de rayonnement solaire.

2.1.7.2 Fonctionnement de la paroi thermique en été :

La plupart des systèmes solaires passifs pourraient être désactivés pendant l'été, ou fonctionnent au verso ; fournir de refroidissement au lieu de chauffage. Par conséquent, la paroi thermique, avec ou sans événements, (mur de masse) offrent la possibilité de refroidissement en été, opérant à cet effet de trois façons :

- Fournir ombrage et pratiquement la suppression de la possibilité de stockage thermique. Cela pourrait se produire à la fois de masse ou d'un mur Trombe.
- Retrait de l'air chaud en ouvrant les grilles supérieure et inférieure du vitrage de la paroi thermique.
- La création d'un flux d'air qui pourrait être généré par l'ouverture de l'orifice supérieur du vitrage et l'orifice inférieur de la paroi. De telle sorte qu'il crée l'effet de "cheminée solaire". En enlevant l'air entre le vitrage et le mur, une faible pression d'air, il crée qui aspire l'air intérieur à l'extérieur.

L'air frais qui pénètre dans la chambre des ouvertures nord comble le vide d'air qui crée. Afin d'assurer que cet air est plus froid la façade nord pourrait être bien ombragée avec des arbres.

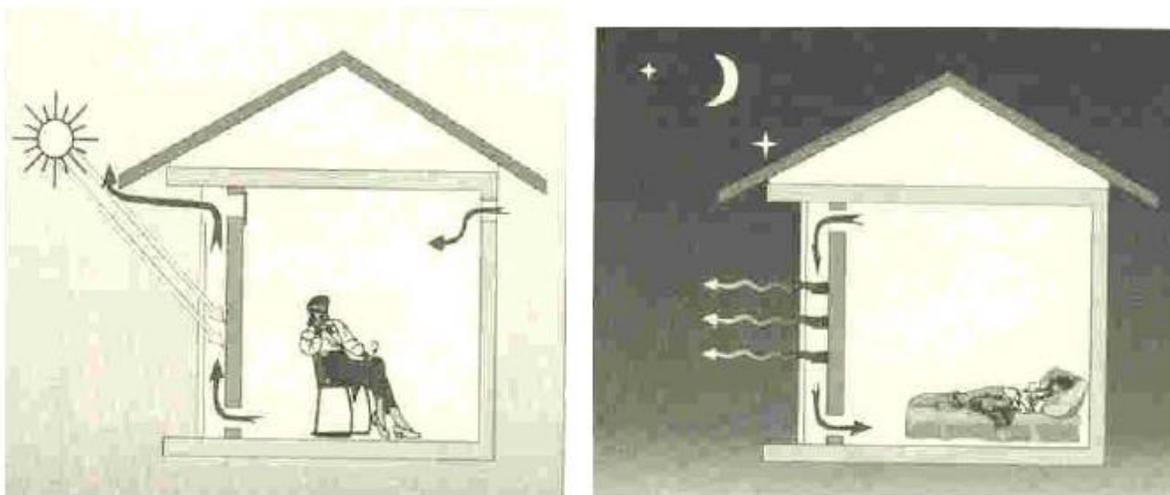


Figure 2.13 : Fonctionnement d'un mur thermique pendant l'été [14]

2.1.7.3 Calculs de l'inertie thermique :

Après sont donnant quelques formules pratiques pour estimer la contribution de la chaleur du système de mur Trombe.

➤ **Circulation de la chaleur : [15]**

$$Q_t = V \times d \times C_p \times (T_s - T_e) \quad (2.1)$$

Où :

V = vitesse d'écoulement d'air (m / s)

d = densité de l'air (kg / m³)

C_p = chaleur spécifique de l'air (KJ / Kg °C)

T_s = Température de sortie d'air (°C)

T_e = Température d'entrée d'air (°C)

➤ **Radiation : [15]**

$$Q_r = \frac{e}{2-e} \times (\sigma T_m^4 - T_{ref}^4) \quad (2.2)$$

e : Facteur d'émission des murs intérieurs

σ : Stefan - Boltzmann constant (20, 41 x 10⁶ KJ / h²k⁴)

T_f : Température de la surface intérieure de la paroi Trombe

T_{ref} : Température moyenne des parois (surface des murs à l'intérieur)

➤ **Convection et la conduction :[15]**

$$Q_c = H (T_m - T_a) \quad (2.3)$$

Où :

H = Coefficient Convection : $5,73 \text{ kJ / h m}^2 \text{ }^\circ\text{C}$

T_f = température de la surface intérieure de la paroi Trombe température

T_a = Air de l'espace de vie.

2.1.7.4 Masse thermique (le mur):

L'épaisseur appropriée de la masse thermique est indispensable pour que le système fonctionne efficacement. La transmission de chaleur dans l'espace intérieur peut être instantanée ou il peut être reporté à 16 heures.

L'inertie thermique de la transmission pendant la nuit et le rayonnement solaire diurne est proportionnel de la capacité thermique pour mètre carré de la masse thermique, mais elle diminue avec l'augmentation de la conductivité du matériau. Utilisation de béton ordinaire dans les prototypes Odeillo, a entraîné une vitesse de transfert d'environ 3,7-4,0 cm par heure. Analytiquement:

60 cm de béton : 14-16 heures

45 cm de béton : 11-12 heures

37 cm de béton : 9-10 heures

La même capacité thermique par unité de surface, il pourrait être entraîné aussi avec des pierres, des briques pleines ou les dalles. La réduction de la masse thermique, le système tend à fonctionner comme un collecteur d'air, avec principalement l'effet de la circulation de la chaleur. Un autre facteur important de la transmission de la masse thermique est le coefficient d'émissivité de la surface interne.[15]

2.1.7.5 Thermo-circulation :

Le mur capteur transmet l'énergie solaire captée par deux moyens, une partie est transmise par conduction à travers le mur qui la restitue à l'intérieur du local par convection, alors que la deuxième partie se transmet par circulation naturelle de l'air chaud se trouvant dans la cheminée solaire à travers les orifices. Le débit de cet air peut être calculé par la relation suivante[16] :

$$m = A_d \sqrt{\frac{2gH(T_m - T_{in})}{cT_m}} \quad (2.4)$$

$$C = C_1 \cdot \left(\frac{A_d}{A_v}\right)^2 + C_2 \quad (2.5)$$

Avec :

$$C_1 = 8 \text{ et } C_2 = 2$$

Deux approches différentes pour le calcul de la température le long de la cheminée solaire ont été utilisées.

Les résultats expérimentaux ont été tirés d'une étude faite en Toscane (Italie) sur un local ayant les caractéristiques suivantes : [17]

Surface du mur Trombe : 32.5 m².

Epaisseur du mur Trombe : 60 cm.

Surface des orifices de circulation : 5 % de la surface du mur Trombe.

Volume de la pièce : 244 m³.

Première approche : La variation de la température de l'air le long de la cheminée solaire (T_m) est supposée être linéaire.

$$m \cdot c_p \frac{dT_m}{dt} = hc \cdot (T_1 - T_m) + hc \cdot (T_g - T_m) \quad (2.6)$$

Deuxième approche : La variation de T_m est supposée être non linéaire [18]

$$T_m = T_{in} + \left(\frac{2 \cdot T_{in} - T_1 - T_g}{2}\right) \cdot \left(-\frac{m \cdot c_p}{2 \cdot hc \cdot A} \cdot \exp\left(-\frac{2 \cdot hc \cdot A}{m \cdot c_p}\right) - 1\right) \quad (2.7)$$

Afin de recommander celle qui se rapproche le mieux avec la réalité, nous avons procédé à un travail de simulation, le modèle analogique est représenté sur la figure 2.14

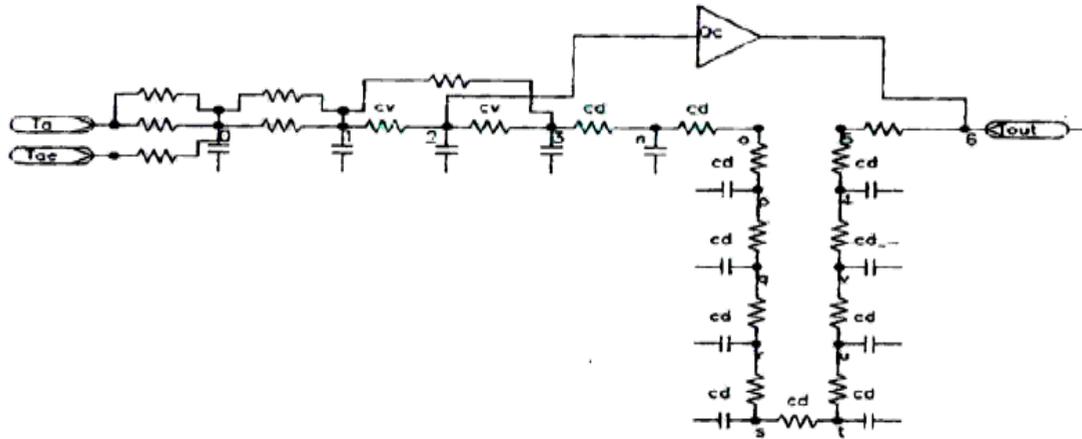


Figure 2.14: Schéma électrique du mur [17]

Il en ressort d'après la figure 2.15 que l'approche théorique considérant une variation linéaire de la température le long de la cheminée solaire surestime le flux échangé par thermocirculation contrairement à la deuxième qui donne des valeurs proches des résultats réels.

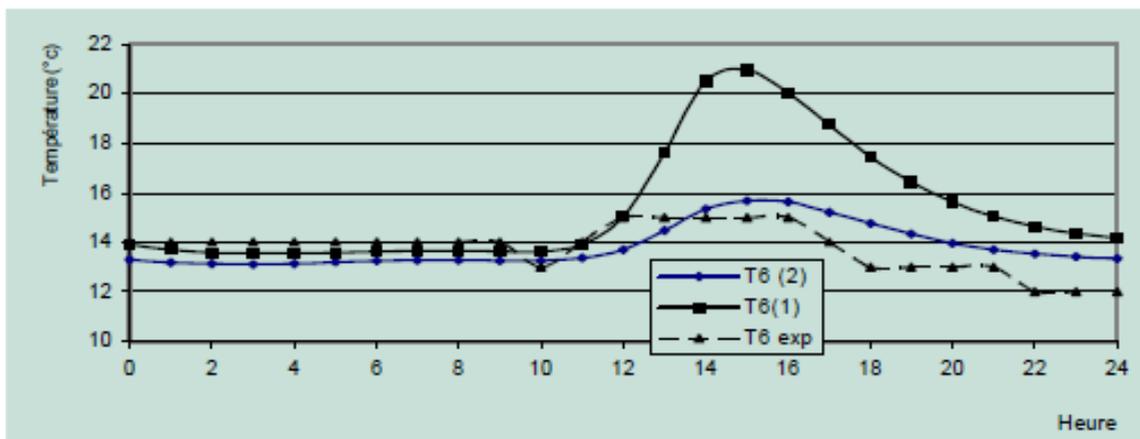


Figure 2. 15 : Evolution de la température interne du local avec deux méthodes pour l'évaluation du flux échangé par thermo circulation [17]

Tableau 2. 1: Flux par thermo circulation

| Modèle | Mc(MJ) |
|--------------------------------------|--------|
| Variation linéaire de la température | 1.8 |
| Variation en exponentielle | 0.86 |

L'intérêt de la thermo circulation et son effet sur l'évolution de la température intérieure du local est illustré par la figure 2.16, nous remarquons que la présence de la thermo circulation conduit à un bilan thermique légèrement supérieur.

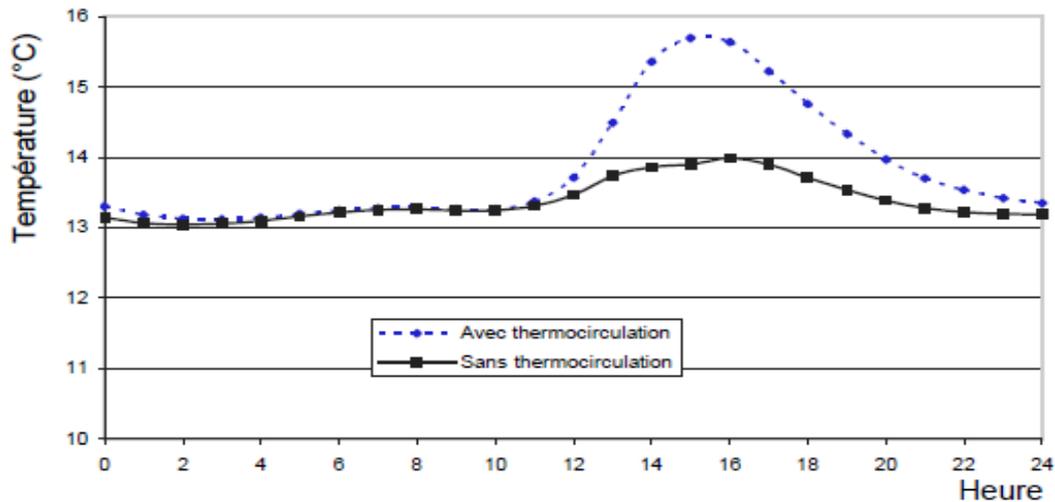


Figure 2. 16 : Influence de la thermo circulation sur la température interne du local [17]

2.1.8 Exemples sur la performance de mure trombe

2.1.8.1 Performances du mur Trombe (Nord de l'Algérie) :

Afin d'évaluer les performances d'un tel dispositif dans les conditions climatiques du nord de l'Algérie, une comparaison a été effectuée entre un local muni d'un mur Trombe de 40 cm d'épaisseur et un local classique sur des journées types d'hiver et d'été, il en résulte d'après la figure 2.17 que la mise en place d'un mur Trombe engendre un gain d'environ 6 °C. [19]

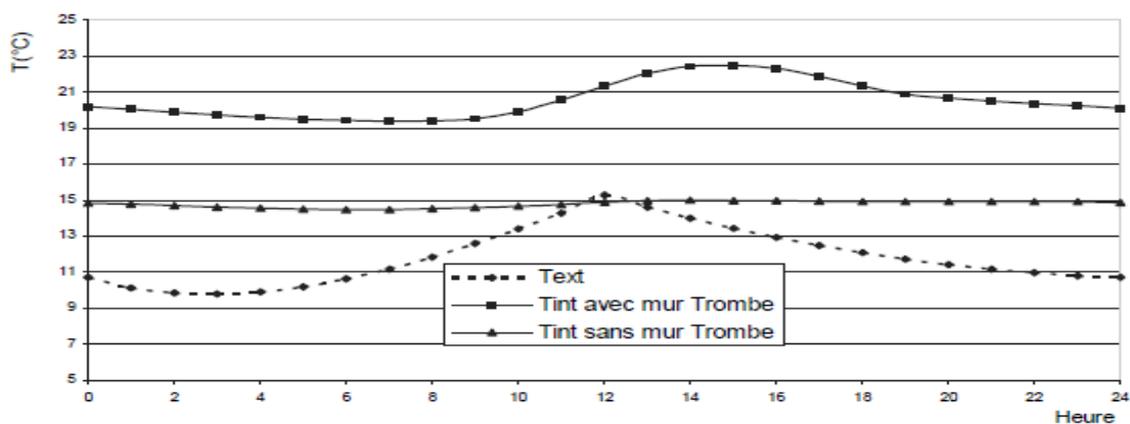


Figure 2. 17 : Evolution de la température du local en hiver [19]

2.1.8.1.1 Effet des dispositifs de protection solaire :

Pour maintenir le local frais pendant les journées chaudes d'été il est nécessaire de prévoir une protection solaire, la figure 2.18 montre que la mise en place de store vénitien peut diminuer la température intérieure du local d'environ 3 °C.

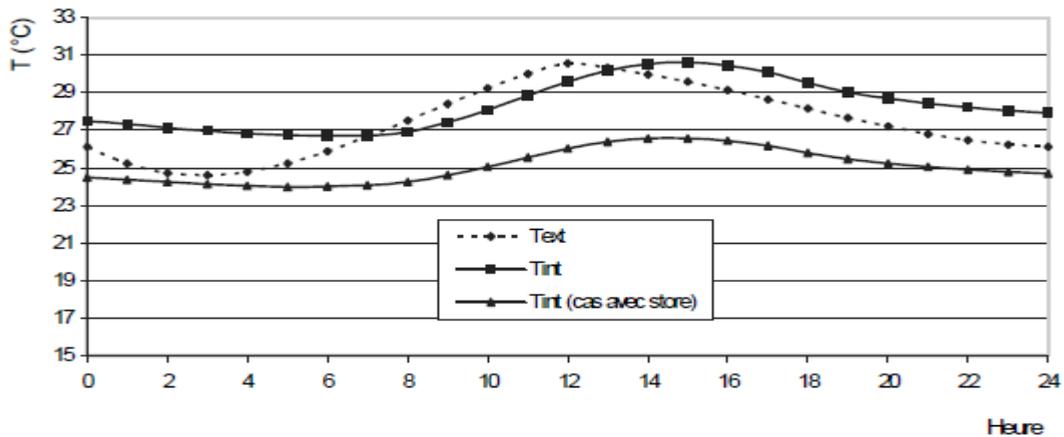


Figure 2. 18 : Evolution de température la du local en été [18]

2.1.8.2 Performances du mur Trombe sur le site de Ghardaïa :

Afin d'évaluer les performances d'un tel dispositif, une comparaison a été effectuée entre une chambre munie d'un mur Trombe et une chambre classique d'une maison située à l'Unité de Recherche Appliquée en Energies Renouvelables à Ghardaïa sur des journées types d'hiver.

Pour déterminer les différentes températures, il est utile d'établir les bilans énergétiques où nous nous intéressons essentiellement aux températures intérieures. Ces dernières seront confrontées avec ceux fournies par l'expérience (en absence du mur Trombe) pour la validation du modèle mathématique conçu qui sera par la suite utilisé pour une étude théorique du mur Trombe.

Dans ce cadre, nous avons jugé indispensable d'utiliser le plan de la maison comme le montre la figure (2.19). [20]

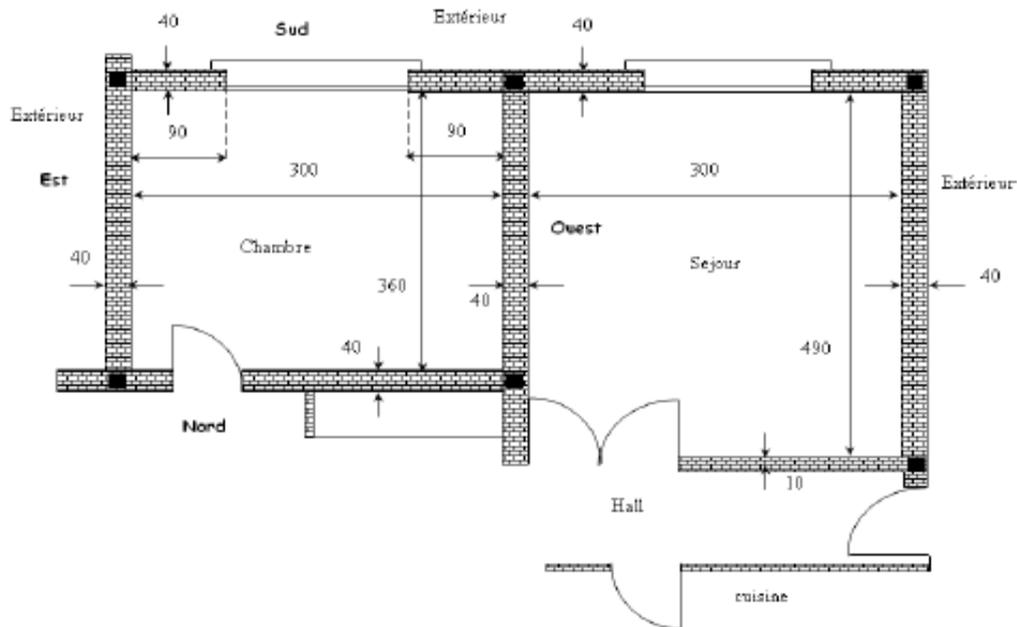


Figure 2. 19 : Plan descriptif des pièces étudiées [20]

Pour le dimensionnement et la caractérisation des deux chambres et cela dans le but d'effectuer une comparaison ultérieure des températures fournies par le modèle. L'enveloppe du bâtiment ou les parois extérieures sont constituées d'une structure lourde généralement de 40 cm de pierre, en deux couches de 1.5 cm de ciment mortier et une couche supplémentaire de 1 cm d'enduit de plâtre.

Les parois intérieures (murs de refend) dont les faces sont en contact seulement avec l'ambiance intérieure, sont assimilées à une structure lourde de 15 cm de pierre, de deux couches de 1.5 cm de ciment mortier et une couche de 1 cm d'enduit de plâtre. Le plancher est posé sur une terre pleine et plate pour le logement du rez-de-chaussée. Il est situé et coulé directement sur le sol, n'occasionne que peu de déperditions.

La forme est constituée de sable, de béton et de carrelage. Le toit est composé d'hourdis ciment, d'une dalle de béton, de sable et de ciment mortier. On remarque d'après la figure (2.20) que les murs exposés à l'extérieur sont : le mur est de la chambre, le mur ouest de la salle de séjour et les deux murs sud. Il est à noter aussi que l'habitat est situé au rez-de-chaussée au-dessous d'un autre logement de même plan.

Et donc comme première étape l'équipe de Ghardaïa ont décidé d'exploiter directement Les données expérimentales fournies par leur station concernant les éclairements globaux et diffus incidents sur un plan horizontale.

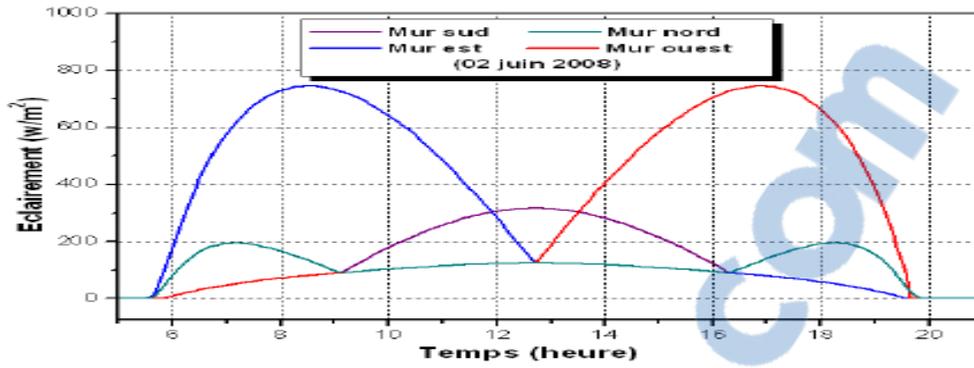


Figure 2. 20 : Eclairéments estimés pour différentes orientations. Ghardaïa 02 juin 2008. [20]

La figure ci-dessous montre l'éclairément estimé pour une surface horizontale sur le site de Ghardaïa :

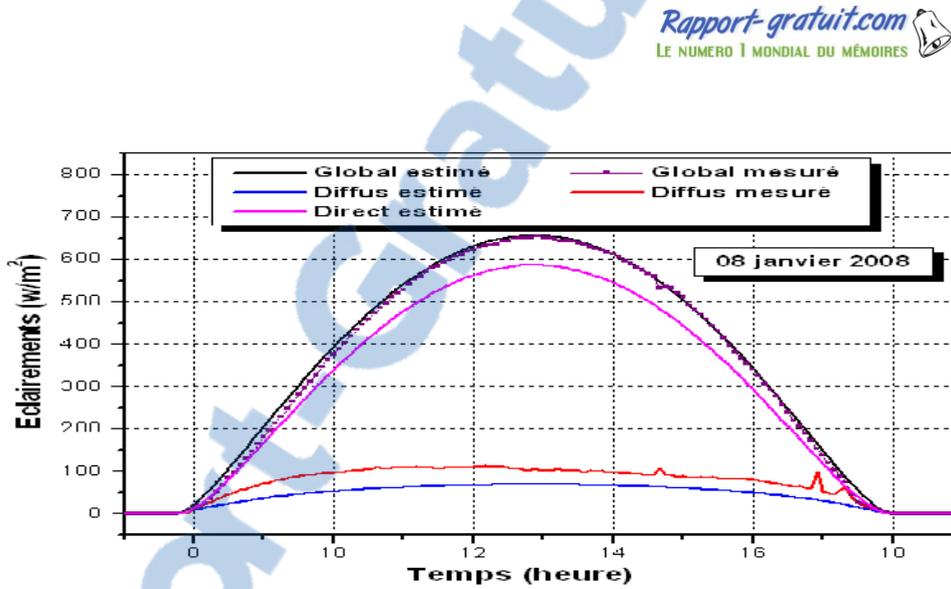


Figure 2. 21 : Eclairéments estimés pour une surface horizontale. Ghardaïa 08 janvier 2008. [20]

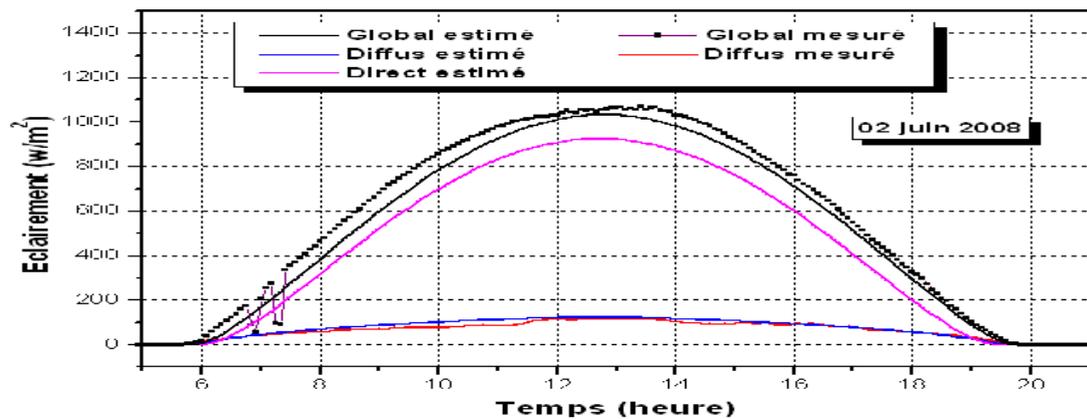


Figure 2. 22 : Eclairéments estimés pour une surface horizontale. Ghardaïa 02 juin 2008. [20]

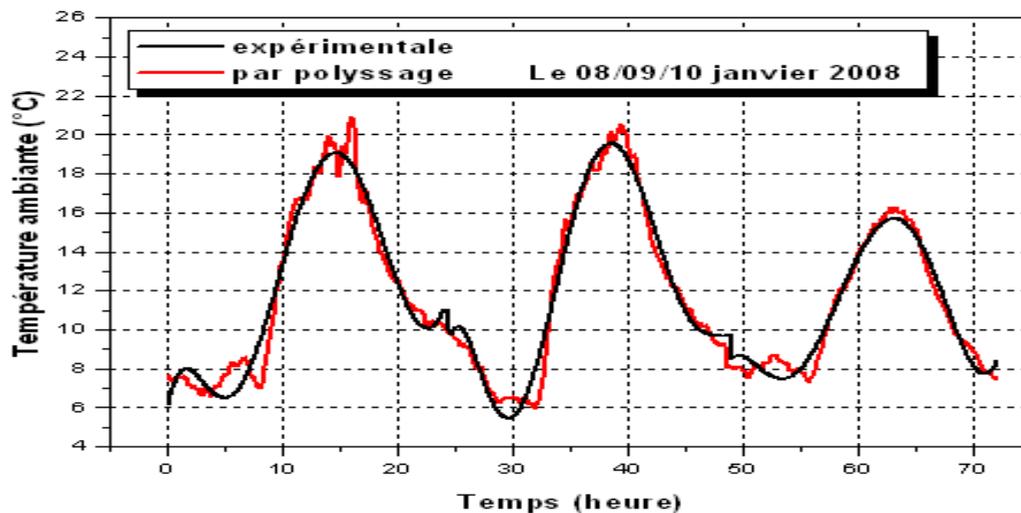


Figure 2. 23 : Température ambiante Ghardaïa le 08 – 09 et le 10 janvier 2008. [20]

2.1.8.2.1 Modèles mathématiques et résultats de la simulation numérique (la pièce et la salle de séjour) :

En appliquant la loi générale de la conservation de l'énergie des deux pièces, on aboutit à un système non autonome de dix-huit équations différentielles ordinaires non linéaires. L'établissement de ces dernières est possible pour toutes les techniques envisagées (Avec et sans mur Trombe) en utilisant la méthode numérique de Runge-Kutta d'ordre 4, Cette méthode assure, en général, une meilleure stabilité de la solution que la méthode d'Euler.

On propose des modèles mathématiques qui permettent d'évaluer les performances énergétiques de la pièce. Ces modèles ne concernent que les échanges thermiques.

On ne peut donc pas étudier la stratification de l'air d'une zone, l'influence du vent sur les infiltrations d'air, la diffusion d'eau dans les parois,... Les changements d'état ne sont pas non plus pris en compte, donc le stockage par chaleur latente n'est pas traité, ni l'effet des variations d'humidité. C'est donc exclusivement l'enveloppe qui est étudiée. Pour faire ces études, quelques hypothèses simplificatrices ont été établies :

Les transferts thermiques à travers les parois sont supposés unidirectionnels, perpendiculaires à ces parois.

La distribution de la température sur les surfaces extérieures et intérieures des murs est uniforme.

Donc, les modèles mathématiques vont délivrer uniquement les températures moyennes de l'air et de la surface considérée.

Le régime est permanent à travers les murs lorsque le flux passe d'une couche vers l'autre.

La convection est naturelle, l'écoulement est laminaire.

Les portes et les fenêtres sont supposées fermées et en bois ordinaire. Leurs températures seront mesurées et imposées.

Pour compléter les modèles mathématiques, il faut déterminer également les conditions aux limites, environnantes et les conditions initiales pour la pièce et pour la salle de séjour. Alors, il faut mesurer par exemple les températures du sol à une profondeur z donnée. Nous avons mesuré aussi les températures des portes et des fenêtres puisque ces dernières rentrent dans les bilans énergétiques globaux.

L'isolation thermique intérieure du mur sud par une lame d'air de 3 cm et une vitre (Mur Trombe) nécessite l'introduction des modifications au niveau des équations des bilans thermiques du mur sud et au niveau de sa surface extérieure.

Les modifications sont effectuées au niveau des équations de la conduction et au niveau des paramètres qui caractérisent les propriétés physiques des matériaux, en particulier, la chaleur spécifique, la densité volumique et la conductivité thermique.

[20]

a- Validation et confrontation avec l'expérience :

Les figures tracées ci-dessous à la validation du modèle destiné à la description du comportement thermique de la pièce en absence de l'isolation.

Les températures de l'air et du mur nord sont sélectionnées pour tracer les profils illustrés sur les figures (2.24) et (2.25) pour le 08 Janvier 2008.

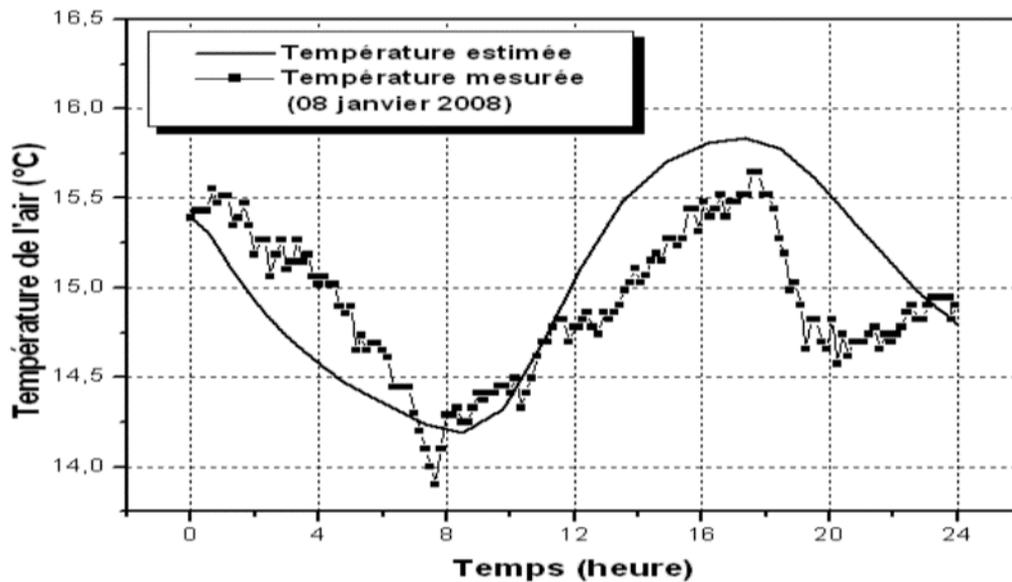


Figure 2. 24 : Température de l'air intérieur de la pièce sans mur Trombe. Ghardaïa 08 janvier 2008 [20]

La figure ci-dessous montre la température du mur nord de la pièce sans mur Trombe :

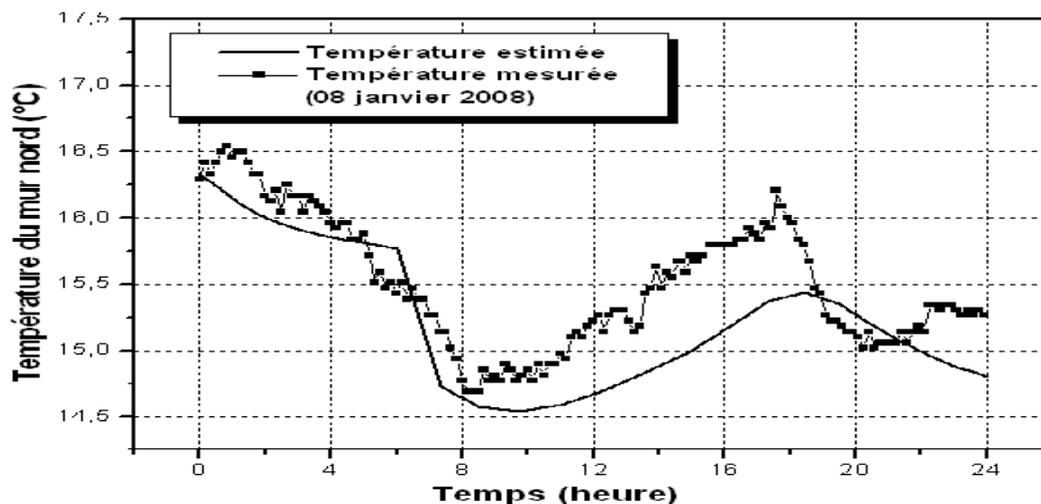


Figure 2. 25 : Température du mur nord de la pièce sans mur Trombe. Ghardaïa 08 janvier 2008 [20]

Une comparaison entre les champs de température calculée et mesurées montre que le modèle mathématique reproduit de manière satisfaisante la réalité physique des phénomènes. Les écarts qui existent sont dus d'une part, aux erreurs de mesures, à l'inertie thermique, aux hypothèses imposées et aux perturbations du système (par des passages nuageux).

B - Etude théorique du mur Trombe par le modèle conçu :

Nous procéderons par les figures tracées ci-après à l'étude de l'isolation thermique par un mur Trombe pour trois journées. Cette étude a pour objet de voir les conséquences de cette technique sur l'évolution des températures de l'air et les surfaces des parois de la pièce isolée. Les conditions initiales des températures de toutes les surfaces et de l'air ont été choisies à partir des valeurs expérimentales.

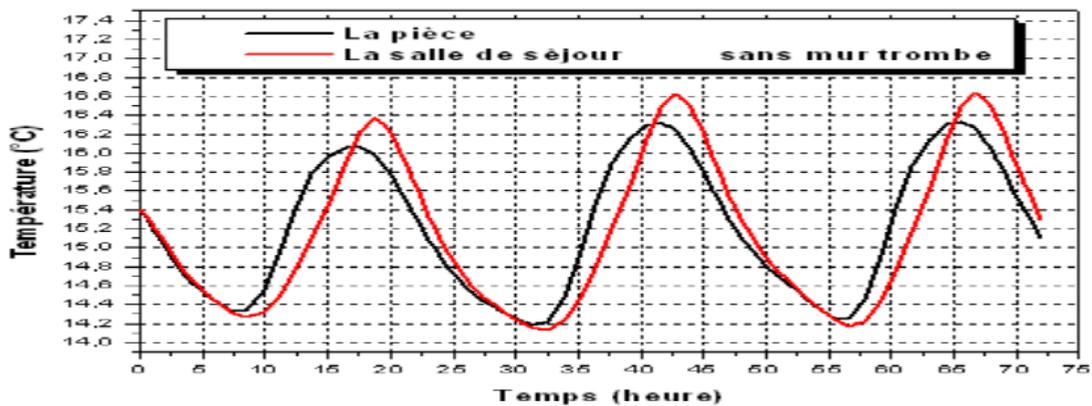


Figure 2. 26 : Température de l'air intérieur de la pièce et de la salle de séjour sans mur Trombe. Ghardaïa 08-09 et le 10 janvier 2008 [20]

Et la figure 2.27 montre les résultats de la température de l'air intérieur de la pièce avec et sans mur Trombe :

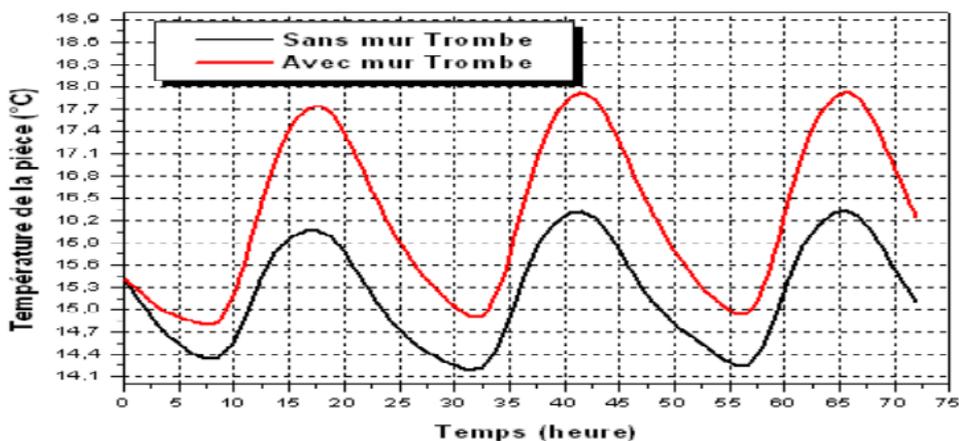


Figure 2. 27 : Température de l'air intérieur de la pièce avec et sans mur Trombe. Ghardaïa 08-09 et le 10 janvier 2008 [20]

Ensuite en a sur la figure 2.28 les résultats qui montre les valeurs de température du mur sud de la pièce avec et sans mur Trombe.

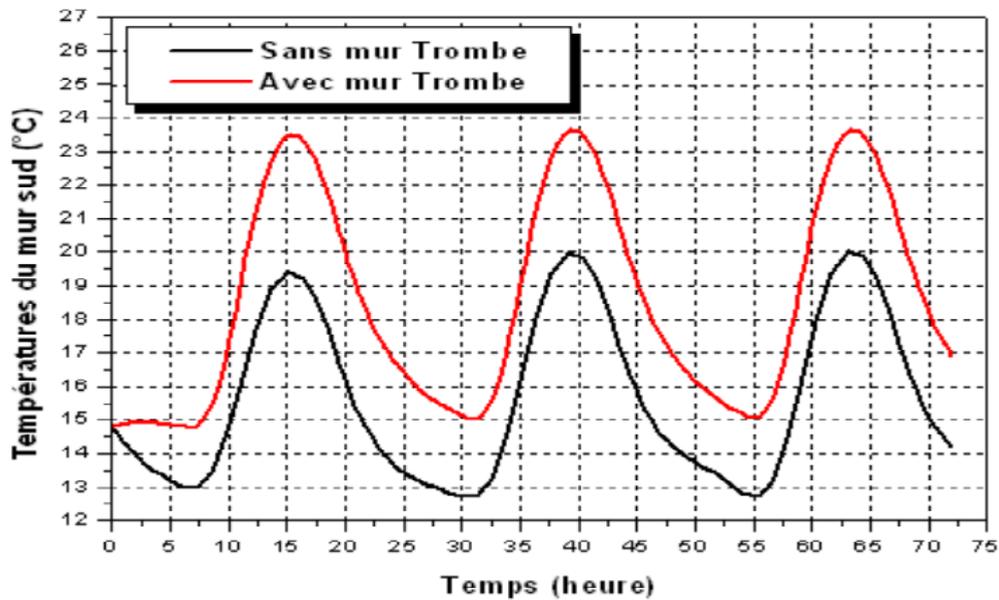


Figure 2. 28 : Température du mur sud de la pièce avec et sans mur Trombe. Ghardaïa 08-09 et le10 janvier 2008 [20]

Et aussi on a sur la figure (2.29) les résultats de la température de l’air intérieur de la salle de séjour avec et sans mur Trombe :

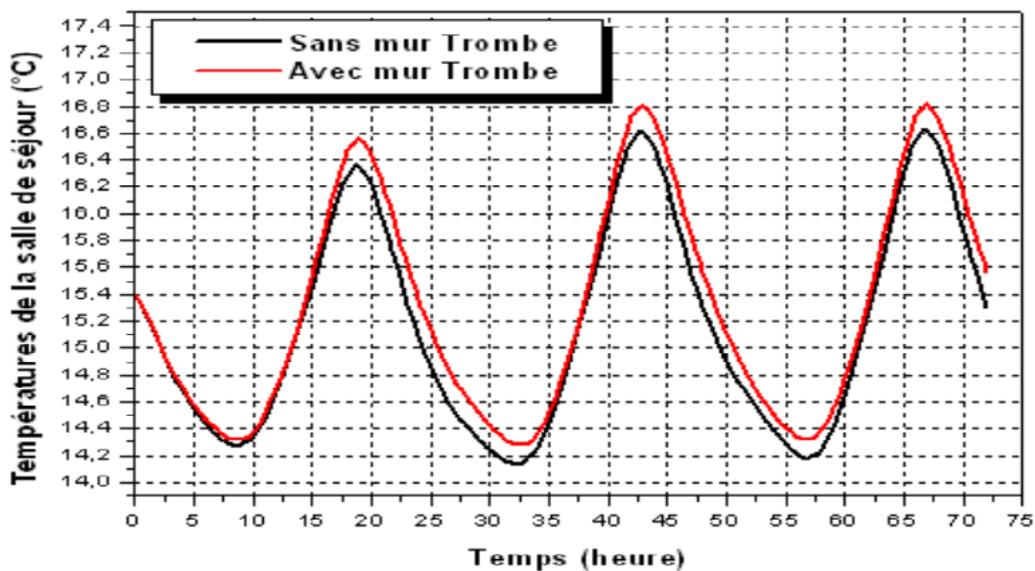


Figure 2. 29 : Température de l’air intérieur de la salle de séjour avec et sans mur Trombe. Ghardaïa 08-09 et le10 janvier 2008 [20]

On a ci-dessous les résultats de la température de l'air intérieur de la pièce et de la salle de séjour avec en présence du mur Trombe :

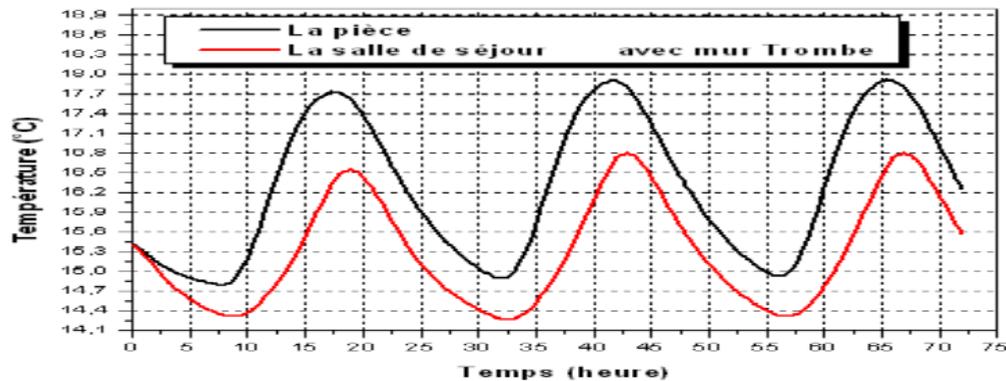


Figure 2. 30 : Température de l'air intérieur de la pièce et de la salle de séjour avec en présence du mur Trombe. Ghardaïa 08-09 et le10 janvier 2008 [20]

c- Commentaires :

La figure (2.26) présente les températures de l'air intérieur de la pièce et de la salle de séjour en absence du mur Trombe. Il est remarquable qu'il y a un certain décalage entre les températures à la fin de chaque journée (à partir de 16 :00), c'est dû au rayonnement reçu par la surface ouest de la salle de séjour le soir, c'est encore une preuve que le modèle a permis d'une manière acceptable de reproduire les processus de transfert entre les différentes parties du système étudié et peut être donc utilisée pour étudier la technique envisagée.

Les figures (2.27) et (2.28) donnent les températures de l'air intérieur et du mur sud de la pièce munie d'un mur Trombe, la différence est apparente et l'effet du mur Trombe est visible sur les champs des températures bien qu'il n'est pas assez important mais il faut prendre en compte la capacité de stockage du matériau de construction (la pierre) qui a le pouvoir d'emmagasiner le froid au cours des journées d'hiver.

Il est donc préférable de traiter la technique d'isolation sur une marge de temps plus étendue pour pouvoir voir l'effet.

La figure (2.30) présente une comparaison entre les températures de l'air de la pièce et de la salle de séjour respectivement. Il est à noter que les températures de la salle de séjour sont à leur tour influencées par la présence du mur Trombe malgré son existence dans une pièce adjacente et bien que l'effet soit minime, ce qui est remarquable sur la figure (2.29).

2.2 Etude théorique sur la cavité

2.2.1 La modélisation des transferts de chaleur dans une cavité ventilée naturellement

L'étude de l'écoulement entre deux plaques chauffées a abouti à de nombreux modèles. Ces modèles s'appuient sur des choix de représentation des phénomènes entrant en jeu, en particulier pour les échanges radiatifs et les échanges convectifs. Pour ces premiers, il s'agit d'une part des échanges radiatifs entre l'extérieur et le parement et d'autre part de ceux qui ont lieu au sein du système solaire passif étudié.

Les modèles décrivant la convection naturelle qui prend place au sein de la lame d'air ont pour objectif de déterminer le coefficient de convection et le débit de renouvellement d'air et peuvent être répartis en 3 familles : l'approche numérique, qui correspond à la résolution des équations de Navier-Stokes par les méthodes de CFD, et deux approches analytiques, l'une en se centrant sur l'effet cheminée, et l'autre sur les pertes de charge de l'écoulement.

2.2.2 Les échanges radiatifs

Dans ce paragraphe, l'objectif est de présenter les bilans d'énergie liés aux échanges radiatifs dans le système considéré. Nous présentons ici les phénomènes entrant en jeu et les hypothèses correspondant aux choix de modélisations que l'on trouve dans la littérature scientifique.

2.2.2.1 Rayonnement solaire et distinction entre CLO et GLO

Tous les corps émettent un rayonnement électromagnétique, qui dans le cadre de transfert de chaleur peut être appelé rayonnement thermique. La longueur d'onde associée au rayonnement émis dépend de la température de la surface émettrice, et la loi de Planck permet de donner la longueur d'onde du maximum d'émission en fonction de la température. La température de la surface extérieure du soleil est de l'ordre de 5870 K, de sorte que son rayonnement électromagnétique est essentiellement dans le visible (entre 0,4 μm et 0,8 μm). Pour des températures de surfaces de corps comme ceux que l'on trouve dans le système ici étudié, le rayonnement associé se trouve dans l'infrarouge (10 μm).

Il faut remarquer que l'atmosphère filtre le rayonnement solaire, et c'est majoritairement l'énergie solaire correspondant à la plage 0,25 à 2,5 μm qui atteint la surface terrestre.

Le bilan d'énergie radiative à effectuer sur un corps à la surface terrestre doit aussi inclure le rayonnement de l'environnement qui comprend :

- Le rayonnement de l'atmosphère, son émission propre et la part réfléchie du rayonnement terrestre, qui est appelé rayonnement du ciel,
- Le rayonnement des surfaces en regard du corps considéré.

Il apparaît alors que l'on peut distinguer deux types de rayonnement, comme le fait la norme EN ISO

9288 :1989. « Isolation thermique -- Transfert de chaleur par rayonnement -- Grandeurs physiques et définition » :

- Le rayonnement en courtes longueurs d'onde (CLO) d'origine solaire direct et diffus (0,25 μm à 2,5 μm)
- Le rayonnement de grandes longueurs d'onde (GLO) émis par des sources terrestres (ENV) proches de la température ambiante (2,5 μm à 100 μm)

Ce choix se justifie par le fait que les éléments transparents comme le vitrage ont un comportement sélectif : ils se comportent comme des passes hauts, laissant passer les ondes courtes (de hautes fréquences) mais pas les longues (de basses fréquences). Ainsi leurs propriétés radiatives doivent être différenciées selon ces deux plages. La limite entre les deux est placée à 2,5 μm .

La puissance rayonnée par un corps est donnée par la loi de Stefan-Boltzmann. Ainsi une surface d'émissivité ϵ à la température T émet une densité de flux radiatif égale à :

$$q = \epsilon \sigma T^4 \quad (2.8)$$

2.2.2.2 La prise en compte du phénomène de multi-réflexion entre les deux plaques

Pour le flux radiatif en CLO incident sur une façade le phénomène de multi-réflexion intervient. La part de rayonnement transmis par la protection solaire semi-transparente, peut ensuite être soit absorbée, soit réfléchiée par le mur. Ensuite cette part réfléchiée, peut à nouveau être transmise, réfléchiée ou absorbée par la face interne de la protection solaire, comme illustré sur la figure 1.8.

On se base sur l'étude de Rodriguez *et al.* (2007) qui décrit les bilans radiatifs 1D pour un produit recouvert d'un film semi-transparent et soumis au rayonnement solaire.

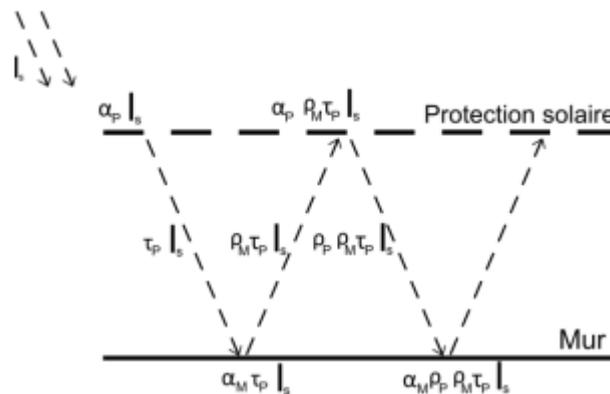


Figure 2.31 : Schéma du phénomène de multi-réflexion du rayonnement CLO [21]

Ainsi, pour la sollicitation radiative extérieure reçue par la protection solaire sur sa face interne (point), en CLO, après avoir écrit la forme développée, et reconnu une série géométrique, la forme simplifiée s'écrit :

$$I_{\text{CLO},P_i} = \frac{\alpha_{P,\text{CLO}} \tau_{M,\text{CLO}}}{1 - \rho_{P,\text{CLO}} \rho_{M_i,\text{CLO}}} I_s \quad (2.9)$$

2.2.2.3 Echange radiatif entre deux surfaces

Les flux émis sont calculés à partir des températures de surface et des propriétés radiatives des matériaux en GLO. Les formes développées des échanges entre les deux surfaces sont prises en compte.

Pour le bilan d'énergie radiative entre deux surfaces à températures T_1 et T_2 d'émissivité ϵ_1 et ϵ_2 se faisant face à écart constant, et dont la distance de l'une à l'autre est faible devant leur hauteur, le flux net perdu par la surface 1 s'écrit :

$$q_{\text{GLO}} = \frac{(T_1^4 - T_2^4)}{\left(\frac{1}{\epsilon_1} + \frac{1}{\epsilon_2} - 1\right)} \quad (2.10)$$

Pour l'intégration dans le modèle numérique, l'expression des bilans radiatifs est linéarisée, et on a alors :

$$q_{\text{GLO}} = h_{\text{rad}} (T_1 - T_2) \quad (2.11)$$

Avec

$$h_{\text{rad}} = (T_1^2 + T_2^2)(T_1 + T_2) / \left(\frac{1}{\epsilon_1} + \frac{1}{\epsilon_2} - 1\right) \quad (2.12)$$

h_{rad} est le coefficient d'échange radiatif entre les deux surfaces. Il dépend de la température de ces surfaces.

2.2.2.4 Echange entre la surface extérieure de la protection solaire et l'environnement

La densité de flux incident en GLO incident sur la surface externe du complexe s'écrit :

$$q_{\text{GLO,ciel-P}_0} = (\epsilon_{\text{ENV}} \sigma F T_{\text{ext}}^4 + \sigma(1-F)T_{\text{ciel}}^4) \quad (2.13)$$

Avec F le facteur de forme entre la surface considérée et l'environnement. Est la température de brillance du ciel, c'est-à-dire la température telle qu'en appliquant la loi de Stefan-Boltzmann pour le rayonnement, on retrouve la densité de flux radiative en GLO provenant de l'atmosphère. Pour la suite, nous considérons que l'émissivité de l'environnement est de 1, les surfaces extérieures étant mates, et par simplification

2.2.3 Les échanges convectifs

2.2.3.1 Caractérisation de la convection naturelle

Les transferts de chaleur convectifs qui prennent place à l'échelle de la cavité ouverte d'un système solaire passif de façade sont de deux types. D'abord les échanges par transport convectif correspondant à l'énergie transportée par l'air dans son écoulement vertical, et sont donc associés au débit de renouvellement d'air. Ensuite, les échanges convectifs entre les surfaces de la cavité et l'air qui sont caractérisés par un coefficient de convection. Ces données sont représentées sur la figure 2.32. On remarque aussi, comme précisé sur la figure, que le profil de

l'écoulement est de forme parabolique, mais par simplification on considère une vitesse moyenne, qui est alors directement liée au débit de renouvellement d'air.

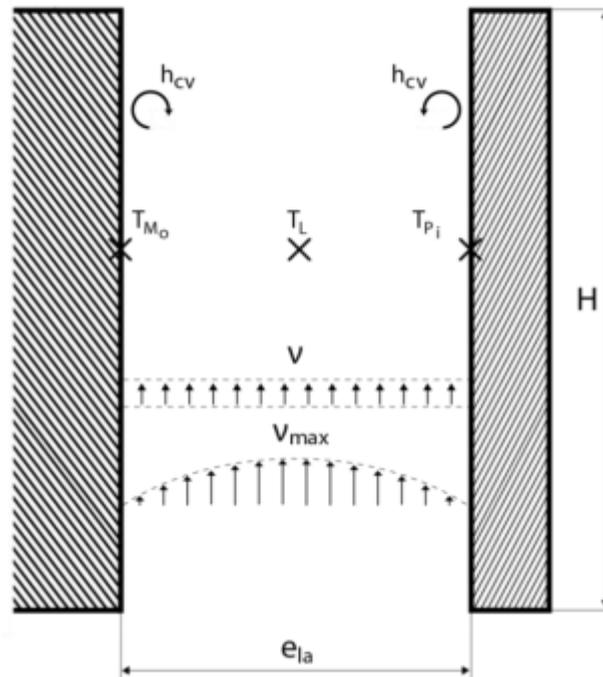


Figure 2.32 : Illustration du profil d'écoulement vertical et de la vitesse moyenne dans une cavité chauffée [21]

Pour la convection naturelle entre deux plaques verticales chauffées asymétriquement, l'écoulement dépend essentiellement de la forme de la cavité, de la chaleur totale fournie à l'air, et de sa distribution, Aung et al. (1972). Les nombres adimensionnés caractéristiques sont ceux de Rayleigh, de Prandtl et le rapport de forme de la cavité (rapport entre épaisseur et hauteur de la lame d'air). Ici, on peut considérer que le nombre de Prandtl est constant pour l'air et égale à 0,71. Le nombre de Rayleigh caractérise le transfert au sein du fluide, c'est à dire le type d'écoulement. Inférieur à une première valeur limite, le transfert est essentiellement conductif, au-delà, c'est la convection qui domine, l'écoulement étant laminaire et enfin, au-delà d'une autre valeur critique, il y a écoulement turbulent.

Le nombre de Rayleigh se calcule à partir du nombre de Grashof. Pour la convection naturelle, qui prend place entre deux plaques verticales, associé à un mouvement de renouvellement d'air sur toute la hauteur H , comme sur la figure 2.32, le nombre de Rayleigh est donné par :

$$Ra_H = Gr_H \ Pr = \frac{g\beta\rho_{air}^2 H^3}{\mu^2} \left(\frac{T_{M0} + T_{Pi}}{2} - T_{ext} \right) * Pr \quad (2.14)$$

Les échanges convectifs à l'interface solide-air sont décrits par le nombre de Nusselt, qui pour l'écoulement entre deux plaques est défini par :

$$Nu = \frac{h_{cv} \cdot 2e_{la}}{\lambda_{air}} \quad (2.15)$$

Les modèles déterminant le coefficient de convection et le débit de renouvellement d'air peuvent être répartis en trois familles que nous présentons ici, l'approche numérique, qui correspond à la résolution des équations de Navier-Stokes par les méthodes de CFD, et deux approches analytiques, l'une se centrant sur l'effet cheminée, et l'autre sur les pertes de charge de l'écoulement.

2.2.3.2 Approche numérique CFD

L'approche numérique consiste en l'utilisation des équations de Navier-Stokes sous certaines hypothèses simplificatrices, afin de déterminer la vitesse d'écoulement de l'air entre deux plaques 18 chauffées asymétriquement. Les équations de conservation de la masse, de la vitesse et de l'énergie sont ainsi utilisées.

Deux approches numériques ont été utilisées depuis les premiers modèles numériques des années 1960. La première, utilisée par Aung et al. (1972) et Kaiser et al. (2004) s'appuie sur l'approximation de Boussinesq en considérant tous les paramètres physiques constants, exceptée la densité volumique. La réécriture des équations de Navier-Stokes fournit alors un problème dont les solutions peuvent être calculées numériquement relativement simplement.

La deuxième considère les équations de Navier-Stokes avec des paramètres non constants, comme le font Kaiser et al. (2004) et Gan en (1998) et (2006). Cette méthode est rendue possible par le développement des outils de calcul informatique, et les techniques de résolution de la CFD.

Pour Aung et al. (1972) le terme moteur considéré est soit la différence de température entre la température de surface des plaques et la température de l'air extérieur, soit les flux de chaleur au niveau des plaques à l'interface entre le solide et l'air. Le nombre de Grashof est alors défini en conséquence. De la même façon, des études de CFD considèrent comme conditions à la limite de la lame d'air soit des températures fixes comme le font Chami et Zoughaib (2010), soit des flux comme Gan (2011).

Ensuite, le nombre de Nusselt et le débit sont calculés pour différents nombres de Rayleigh et de rapports de forme. Des corrélations, pour le coefficient de convection et la vitesse d'air moyenne, sont ensuite proposées. Aung et al. (1972) réalisent un certain nombre de calculs pour des nombres de Rayleigh et débits choisis. Ils constatent alors des relations asymptotiques entre nombre de Rayleigh et nombre de Reynolds, et nombre de Rayleigh d'une part et nombre de Nusselt.

Zamora et Kaiser (2009) étudient l'écoulement (laminaire et turbulent) dans une cheminée solaire pour différents nombres de Rayleigh et différents rapports de forme, en utilisant un code numérique. Des corrélations donnant la valeur de rapport de forme qui maximise le nombre de Nusselt, pour de valeurs de nombre de Rayleigh comprises entre 105 et 1012 ont été établies. Plus le nombre de Rayleigh est élevé, plus le rapport de forme doit être faible pour maximiser les échanges convectifs. Le débit maximal n'est pas atteint pour la valeur maximale du Nusselt, ce qui s'explique par le fait qu'en régime turbulent, des inversions d'écoulement prennent place, favorisant les échanges convectifs mais pas le renouvellement d'air.

Gan (2011) étudie les cheminées solaires, et fournit des expressions générales permettant de calculer d'une part le nombre de Nusselt en fonction du rapport de forme et du nombre de Rayleigh, et d'autre part le nombre de Reynolds en fonction du nombre de Rayleigh et du nombre de Nusselt, permettant ainsi d'obtenir le débit. Il décompose ces relations sur les intervalles sur lesquelles elles sont valables. Il faut noter que ces relations sont valables pour des flux allant de 100 à 1000 W/m², et pour des répartitions variées des flux entre les deux faces de la cavité.

Ces méthodes ont pour avantage une description fine de tout l'écoulement dans la lame d'air, elles permettent aussi d'analyser la nature de l'écoulement de manière locale et notamment sa possible hétérogénéité le long du canal. Mais ces résultats sont établis pour des configurations et des entrées spécifiques, limitant de ce fait leur exploitation pour la modélisation des échanges dans des configurations réelles de protections solaires.[21]

2.3 Accouplement d'un mur trombe avec une cavité solaire

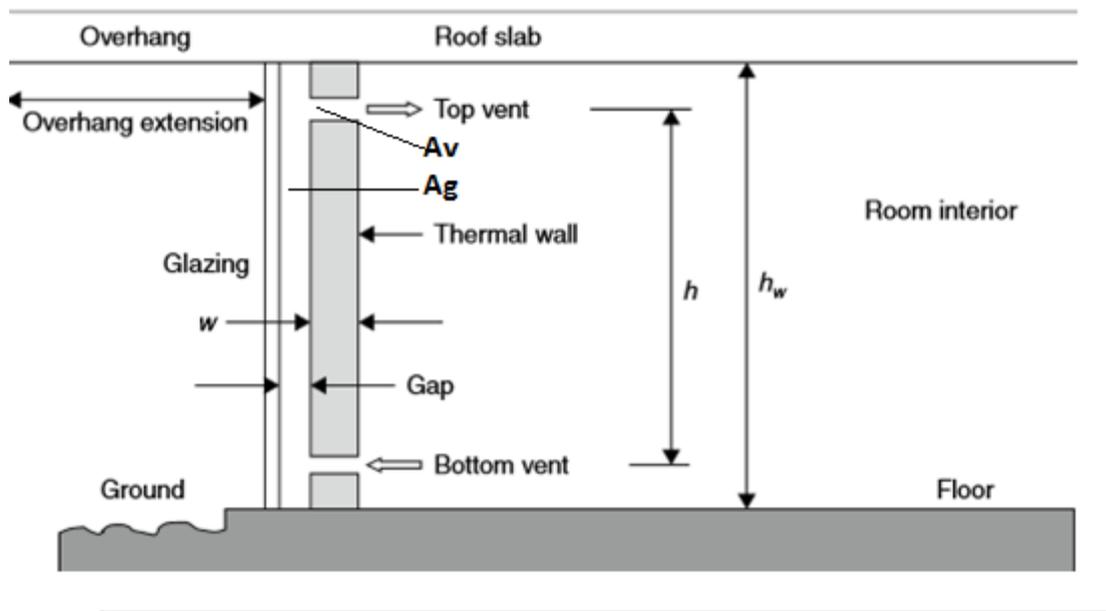


Figure 2.33 : Schéma de la paroi de stockage thermique [22]

De plus, un certain nombre de techniques de modélisation ont été utilisées pour estimer le flux de chaleur à travers une paroi thermique. Un modèle analytique simple a été suggéré par Duffin et Knowles (1985), dans lequel tous les paramètres affectant la performance du mur peuvent être analysés.

Smollec et Thomas (1993) Utilisé un modèle bidimensionnel pour calculer le transfert de chaleur, Jubran et al. (1993) Basés sur le modèle fini Différence pour prédire la réponse transitoire, la distribution de température et le profil de vitesse d'une paroi thermique. La réponse transitoire du mur de Trombe a également été étudiée par Hsieh et Tsai (1988)

Rapport-gratuit.com
LE NUMERO 1 MONDIAL DU MÉMOIRES

2.3.1 Caractéristiques d'un mur de stockage thermique

Une paroi de stockage thermique est essentiellement un capteur solaire à haute capacité couplé directement à la pièce. Le rayonnement solaire absorbé atteint la pièce soit par conduction à travers la paroi jusqu'à la surface de paroi intérieure à partir de laquelle il est transmis par convection et rayonnement dans la pièce ou par l'air chaud qui coule dans l'entrefer. Le mur perd de l'énergie dans l'environnement par conduction, convection et rayonnement à travers les vitrages.

Une paroi de stockage thermique est représentée schématiquement sur la figure 6.4. En fonction de la stratégie de contrôle utilisée, l'air dans l'intervalle peut être

échangé soit avec l'air ambiant, soit avec l'environnement, soit l'écoulement à travers l'espace peut être arrêté. Le flux d'air peut être entraîné par un ventilateur ou être thermosiphonique, c'est-à-dire entraîné par des températures d'air plus élevées dans l'intervalle que dans la pièce. Les études analytiques de l'effet thermosiphonique de l'air sont limitées au cas de l'écoulement laminaire et des pertes de pression de négligence dans les événements d'entrée et de sortie. Trombe et al. (1977) ont indiqué des mesures des débits massiques de thermosiphon, qui indiquent que la plupart des pertes de pression sont dues à l'expansion, à la contraction et au changement de direction de l'écoulement, tous associés aux événements d'entrée et de sortie. Pour les climats chauds d'été, un évent est fourni à la partie supérieure du vitrage (non représenté sur la figure 6.4) pour libérer l'air chaud produit dans l'espace entre le verre et la paroi thermique en aspirant l'air de l'intérieur de la pièce.

Dans le modèle de mur Trombe utilisé dans TRNSYS, le débit d'air thermosiphon est déterminé en appliquant l'équation de Bernoulli à l'ensemble du système de circulation d'air. Par souci de simplicité, on suppose que la densité et la température de l'air dans l'espace varient linéairement avec la hauteur. Solution de l'équation de Bernoulli pour la vitesse moyenne de l'air dans les rendements d'écart (Klein et al., 2005):

$$\bar{v} = \sqrt{\frac{2gh}{c_1 \left(\frac{A_g}{A_v}\right)^2 + c_2} \cdot \frac{(T_m - T_s)}{|T_m|}} \quad (2.16)$$

où

A_g : Surface totale de l'interstice (m²)

A_v : Aire de ventilation totale (m²)

C_1 : Coefficient de perte de pression d'évent

C_2 : Coefficient de perte de pression.

G : Accélération due à la pesanteur (m / s²)

T_m : La température moyenne de l'air dans l'intervalle (K).

Le terme T_s est T_a ou T_R , selon que l'air est échangé avec l'environnement (T_a) ou la pièce (T_R). Le terme $C_1 (A_g / A_v)^2 + C_2$ représente

Les pertes de charge du système. Le rapport $(A_g / A_v)^2$ explique la différence entre la vitesse de l'air dans les événements et la vitesse de l'air dans l'intervalle. La résistance thermique (R) au flux d'énergie entre l'espace et la pièce lorsque le débit massique (m) est fini est donnée par :

$$R = \frac{A \left\{ \left(\frac{m \dot{c}_{pa}}{2h_c A} \right) \left[\exp \left(-\frac{2h_c A}{m \dot{c}_{pa}} \right) - 1 \right] - 1 \right\}}{m \dot{c}_{pa} \left[\exp \left(-\frac{2h_c A}{m \dot{c}_{pa}} \right) - 1 \right]} \quad (2.17)$$

Où

A : Surface murale (m²)

C_{pa} : Chaleur spécifique de l'air (J/kg-°C)

h_c : Coefficient de transfert de chaleur (W/m²K).

La valeur de h_c, le coefficient de transfert de chaleur entre l'espace d'air et la paroi et le vitrage, dépend de l'écoulement de l'air dans l'espace (Klein et al. 2005). Pour un débit nul (Randal et al., 1979)

$$h_c = \frac{k_a}{L} [0,01711 (G_r p_r)^{0,29}] \quad (2.18)$$

OU

k_a : Conductivité Thermique de l'air (W /m-°C).

L : Longueur (m).

G_r: Nombre de Grashof.

p_r: Nombre de Prandtl.

Pour une condition d'écoulement et le nombre de Reynolds, Re > 2000 (Kays, 1966),

$$h_c = \frac{k_a}{L} (0,0158 R_e^{0,8}) \quad (2.19)$$

Pour une condition d'écoulement et le nombre de Reynolds, $Re = 2000$ (Mercer et al. 1967)

$$h_c = \frac{k_a}{L} \left(4,9 + \frac{0,0606(x')^{-1,2}}{1+0,0856(x')^{-0,7}} \right) \quad (2.20)$$

Ou

$$X = \frac{h}{Re Pr \frac{2Ag}{1+W}} \quad (2.21)$$

Selon la figure 2.33 h est la distance entre les ouvertures inférieure et supérieure (m) et W est la largeur de la paroi (m).

2.3.2 Performance de la paroi de stockage thermique

Un bâtiment avec une paroi de stockage thermique est représenté sur la figure 2.34a, où L_m est la perte d'énergie mensuelle du bâtiment, Q_{aux} est l'énergie auxiliaire nécessaire pour couvrir la charge, Q_D est l'excès d'énergie absorbée au-dessus de ce qui est nécessaire pour couvrir le Charge qui ne peut pas être stockée et doit être vidée, et T_R est la température ambiante moyenne, qui est égale à la température de consigne basse du thermostat d'ambiance. L'analyse des murs de stockage thermique est présentée par Monsen et al

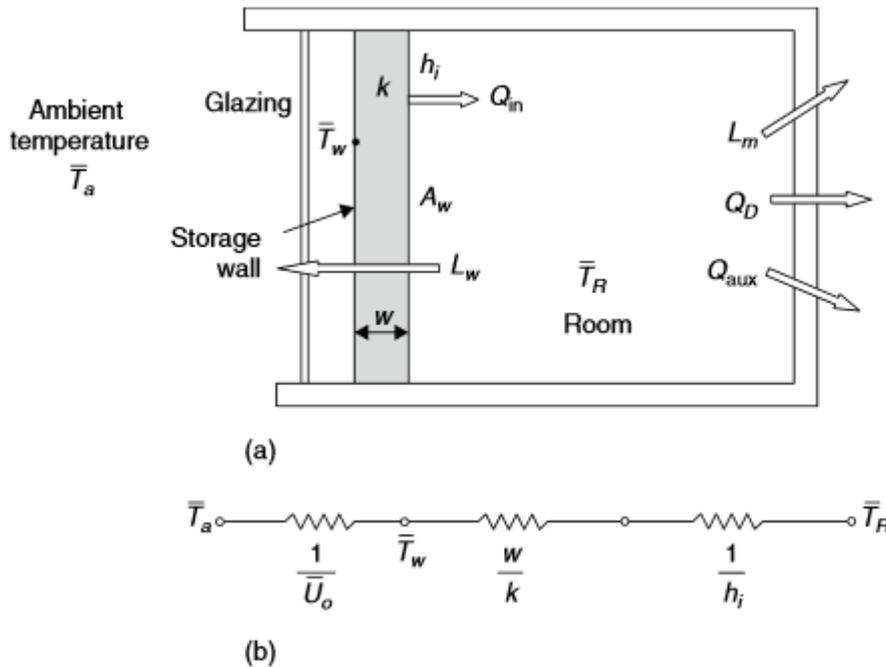


Figure 2.34 :

- (a) Schéma d'une paroi de stockage thermique.
- (b) (B) circuit électrique équivalent pour le flux de chaleur à travers la paroi [22]

(1982) dans le cadre de la méthode d'inutilisation développée pour concevoir ce type de systèmes, la perte mensuelle d'énergie du bâtiment, L_m , est définie comme

$$L_M = \int_{\text{mois}} [(UA)(\bar{T}_R - \bar{T}_a) - \dot{g}]^+ dt = \int_{\text{mois}} [(UA)(\bar{T}_b - \bar{T}_a)]^+ dt \quad (2.22)$$

Ou

(uA) : Produit du coefficient global de transfert de chaleur et surface du bâtiment structure ($W/^\circ C$)

g : Taux de génération de chaleur interne (W)

\bar{T}_a : Température ambiante extérieure moyenne ($^\circ C$)

\bar{T}_b : Température moyenne de l'équilibre intérieur ($^\circ C$), $= \bar{T}_R - \dot{g} / (uA)$.

La variable d'intégration dans l'équation (2.22) est le temps t , et le signe plus indique que seules les valeurs positives sont considérées. Si (UA) et g sont constantes, L_m peut être trouvée à partir de

$$l_m = (uA)(DD)_b \quad (2.23)$$

OU

$(DD)_b$ = Des degrés-jours mensuels évalués à \overline{T}_b .

La perte mensuelle d'énergie du bâtiment par le mur de stockage thermique, L_w , en supposant que le vitrage a une transmissivité nulle pour le rayonnement solaire, peut être trouvée à partir de

$$l_w = U_w A_w (DD)_R \quad (2.24)$$

OU

A_w : Surface de stockage thermique (m^2)

U_w : Coefficient global de transfert de chaleur de la paroi de stockage thermique, vitrage ($W/m^2\text{-}^\circ C$)

$(DD)_R$: Des degrés-jours mensuels évalués à \overline{T}_R

A partir de la figure 2.34b, le coefficient global de transfert de chaleur de la paroi de stockage thermique, y compris le vitrage, est donné à partir

$$U_w = \frac{1}{\frac{1}{U_0} + \frac{W}{K} + \frac{1}{h_i}} \quad (2.25)$$

ou

W = Épaisseur de paroi (m)

K = Conductivité thermique de la paroi de stockage thermique ($W/m\text{-}^\circ C$)

h_i = Coefficient de film de surface de paroi intérieure, $= 8.33 W/m^2\text{-}^\circ C$,

\overline{U}_0 = Le coefficient global moyen de transfert de chaleur à partir de la surface de la paroi extérieure à travers le vitrage jusqu'à la température ambiante ($W/m^2\text{-}^\circ C$).

Habituellement, l'isolation nocturne est utilisée pour réduire les pertes de chaleur de nuit. Dans ce cas, le coefficient moyen de transfert de chaleur \overline{U}_0 est estimé comme la moyenne horaire des valeurs diurnes et nocturnes de

$$\overline{U}_0 = (1-F)U_0 + F\left(\frac{U_0}{1+R_{INS}U_0}\right) \quad (2.26)$$

Ou

U_0 : Coefficient global sans isolation nocturne ($W/m^2\text{-}^\circ C$) .

R_{INS} : Résistance thermique de l'isolant ($W/m^2\text{-}^\circ C$) .

F : Fraction de temps pendant laquelle l'isolation nocturne est utilisée.

Une valeur typique de U_0 pour un seul vitrage est $3. W/m^2 \cdot ^\circ C$ Et pour le double vitrage est $2.5 W/m^2 \cdot ^\circ C$

Le bilan énergétique mensuel du mur de stockage thermique

$$\overline{H}_t(\overline{\tau \alpha}) = U_k(\overline{T}_w - \overline{T}_R)\Delta t + \overline{U}_0(\overline{T}_w - \overline{T}_a)\Delta t \quad (2.27)$$

Ou

\overline{H}_t : Rayonnement quotidien moyen mensuel par unité de surface incident sur le mur (J/m^2).

$(\overline{\tau \alpha})$: La transmittance moyenne mensuelle du vitrage et l'absorption du produit de paroi.

\overline{T}_w : Température moyenne mensuelle de la surface de la paroi extérieure; Voir la figure 2.34a

\overline{T}_R : La température ambiante moyenne mensuelle ($^\circ C$).

\overline{T}_a : La température ambiante moyenne mensuelle ($^\circ C$).

t : Nombre de secondes par jour.

U_k : Coefficient global de transfert de chaleur de la surface de la paroi extérieure à l'espace intérieur ($W/m^2 \cdot ^\circ C$).

Le coefficient global de transfert de chaleur de la surface de paroi externe à l'espace intérieur peut être obtenu à partir de

$$U_k = \frac{1}{\frac{w}{k} + \frac{1}{h_i}} = \frac{h_i k}{wh_i + k} \quad (2.28)$$

L'équation (2.27) peut être résolue pour la température moyenne mensuelle de la surface de la paroi extérieure

$$\bar{T}_w = \frac{\overline{H_t(\tau\alpha)} + (U_k \bar{T}_R + \overline{U_0 T_a}) \Delta t}{(U_k + \overline{U_0}) \Delta t} \quad (2.29)$$

Enfin, le gain de chaleur mensuel net de la paroi de stockage thermique au bâtiment est obtenu à partir

$$Q_g = U_k A_w (\bar{T}_w - \bar{T}_R) N \cdot \Delta t \quad (2.30)$$

N : nombre de jours dans le mois[22]

CONCLUSION

Les installations solaires thermiques pourraient satisfaire jusqu'à 70% des besoins en eau chaude sanitaire et 50% des besoins en chauffage d'un foyer, dans une zone disposant d'un bon rayonnement solaire.

Dans ce chapitre, nous avons présenté différents systèmes solaires passifs de façade.

Le mur Trombe est avant tout un système de chauffage ou de rafraîchissement solaire, il faut absolument que le capteur soit isolé de la maison (pour éviter la surchauffe en été), et la déperdition la nuit. Son fonctionnement est principalement diurne, il s'utilisera donc bien pour les établissements ne fonctionnant pas la nuit (écoles, bureaux).

Chapitre 3 :

Simulation de la cavité couplée à un mur trombe

Introduction

Dans le but de l'étude et la simulation d'une cavité couplée à un mur trombe on a construit un plan architectural qui répond sur les besoins et les normes d'une salle et qui aussi adapte un système de chauffage par mur Trombe. La simulation par Fluent concerne le fonctionnement du mur Trombe couplé avec la salle pendant la saison hivernal dans le but de déterminer les performances du système mur Trombe-salle.

3.1 Situation géographique de la ville de Tlemcen

La Wilaya de Tlemcen occupe une position de choix au sein de l'ensemble national. Elle est située sur le littoral Nord-ouest du pays et dispose d'une façade maritime de 120 km. C'est une wilaya frontalière avec le Maroc, Avec une superficie de 9017,69 Km². Le Chef lieu de la wilaya est située à 432 km à l'Ouest de la capitale, Alger.



Figure 3.1 : Situation Géographique Région Tlemcen [23]

La wilaya est limitée par :

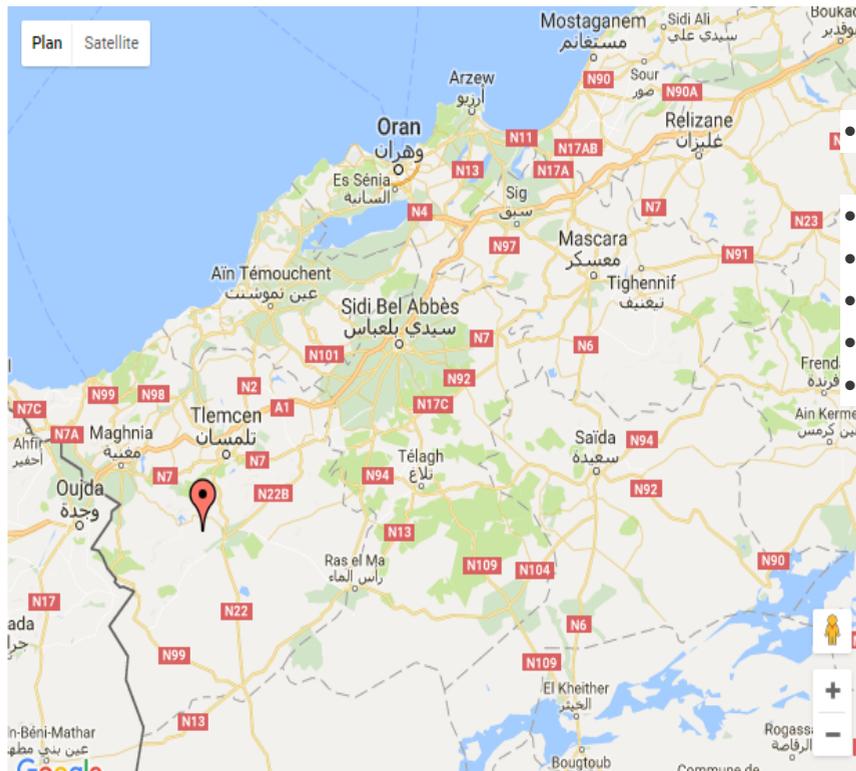
La mer méditerranée au Nord

La wilaya d'Ain Témouchent à l'Est

La wilaya de Sidi Bel Abbès à l'Est- Sud –Est

La wilaya de Saida au Sud

Le Maroc à l'Ouest. [23]



Informations de Wilaya de Tlemcen

- Ville : Wilaya de Tlemcen
- Région : 15
- Pays : Algérie
- Population : 949135
- Latitude : 34.66667
- Longitude : -1.41667

Figure 3.2 : localisation de la ville Tlemcen [24]

Wilaya de Tlemcen est une ville Algérienne de 949135 habitants. Le code région est 15, les coordonnées géographiques de Wilaya de Tlemcen sont : Latitude 34.66667 et Longitude -1.41667. [24]

3.2 Climat de la ville de Tlemcen

Le climat y est chaud et tempéré. L'hiver à Tlemcen se caractérise par des précipitations bien plus importantes qu'en été. D'après Köppen et Geiger, le climat y est classé Csa. La température moyenne annuelle à Tlemcen est de 16.0 °C. Sur l'année, la précipitation moyenne est de 484 mm.



Figure 3.3 : vue du ciel de plateau Lella Setti

TABLEAU 3.1 : Conditions Climatique de Tlemcen

| | Janvier | Février | Mars | Avril | Mai | Juin | Juillet | Août | Septembre | Octobre | Novembre | Décembre |
|-----------------------------------|---------|---------|------|-------|-----|------|---------|------|-----------|---------|----------|----------|
| Température moyenne (°C) | 14 | 15 | 17 | 19 | 22 | 27 | 31 | 31 | 27 | 23 | 17 | 14 |
| Température minimale moyenne (°C) | 3 | 3 | 5 | 7 | 10 | 15 | 18 | 19 | 16 | 12 | 7 | 4 |
| Température maximale (°C) | 21 | 22 | 25 | 27 | 31 | 35 | 38 | 37 | 33 | 30 | 25 | 21 |

Juillet est le mois le plus sec. En Décembre, les précipitations sont les plus importantes de l'année avec une moyenne de 75 mm. Au mois d'Aout, la température moyenne est de 31 °C. Aout est de ce fait le mois le plus chaud de l'année. Janvier est le mois le plus froid de l'année. La température moyenne est de 14 °C à cette période. Les précipitations varient de 71 mm entre le plus sec et le plus humide des mois. [25]

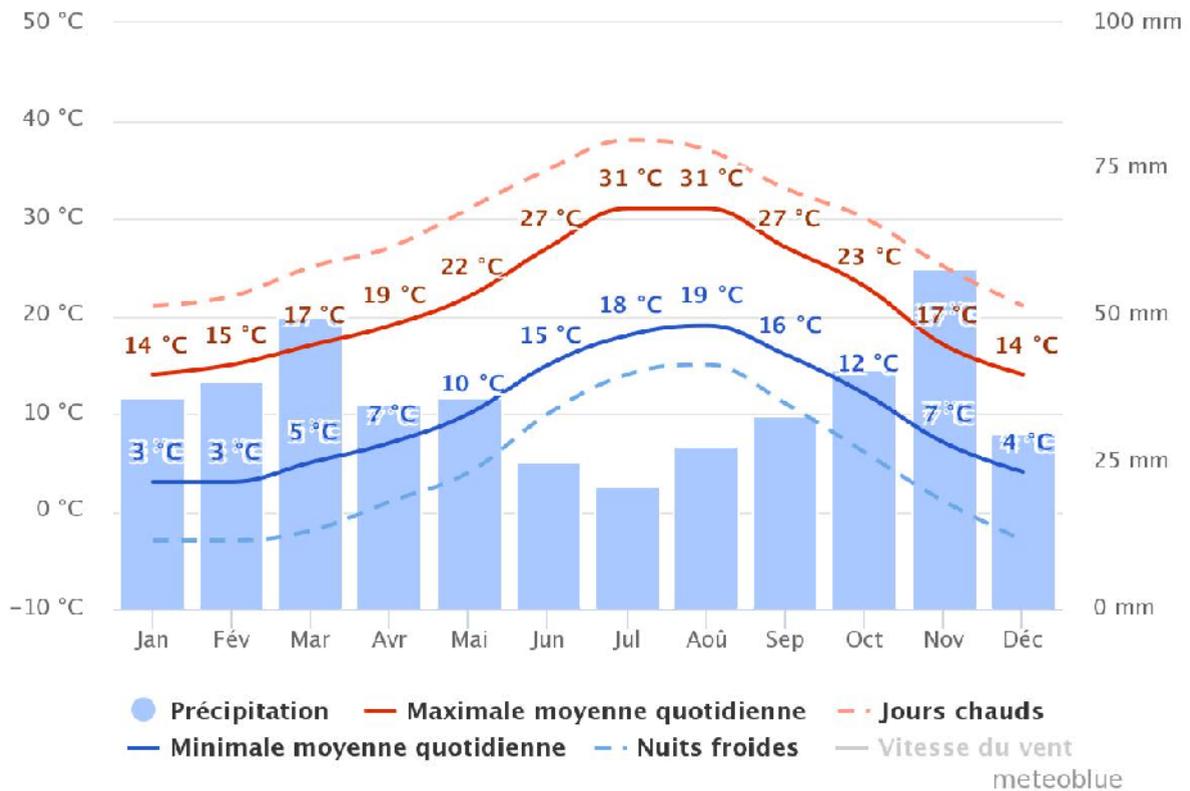


FIGURE 3.4 : Courbe de température et précipitation de Tlemcen [25]

3.3 Description de la salle étudiée

3.3.1 Architecture de la salle

La salle étudiant est située à Tlemcen (ouest d'Algérie). Elle présente une superficie de 9 m².

L'architecture et la disposition de la salle lui permettent de mieux capter le rayonnement solaire puisque notre salle est orientée vers le sud. L'architecture de la salle est bien développée pour s'adapter au système de chauffage et climatisation par le mur trombe et aussi respect les normes de l'architecture bioclimatique.

3.3.1.1. Masse thermique

L'utilisation d'une masse thermique importante a pour but de répartir dans le temps l'apport des différents gains énergétiques afin de diminuer les surchauffes. Cette masse thermique permet aussi de redistribuer la chaleur qu'elle contient lorsque les autres formes de gains sont moins importantes. La principale composante de cette masse thermique est constituée d'un mur en BTS (Brique de Terre Stabilisée), ce mur, qualifié de mur thermique est directement exposé aux rayons solaires durant une bonne partie des journées d'hiver. Il accumule alors la chaleur du soleil pendant le jour pour la redistribuer le soir après le coucher du soleil.

3.3.1.2. Ventilation naturelle

La ventilation a un double objectif : le premier est de veiller à ce que l'air intérieur soit de bonne qualité, en maintenant les polluants qu'il contient à des concentrations sans effet ou d'effet limité sur la santé. Ceci est impératif pour le bien-être des occupants, mais aussi pour éviter toute dégradation du bâti, pouvant être causée par exemple par un excès d'humidité.

Le second objectif de la ventilation des locaux est d'y maintenir des conditions de confort thermique acceptables pour les occupants, essentiellement en saison chaude, grâce à un apport d'air neuf qui rafraîchit directement les occupants, par échanges convectifs.

Les murs trombe peuvent être utilisés comme cheminée solaire et en ajoutant une ouverture d'aspiration d'air neuf dans la façade nord pour la période estivale. [26]

3.3.2. Description et matériaux de construction

Les murs assurent la stabilité du bâtiment pour l'empêcher de se déformer sous les actions de la nature (mouvement de terrain, vent). Ils peuvent être également murs de clôture pour entourer une propriété et réduire les nuisances sonores de la rue ou des voisins.

Il existe différents types de murs, correspondant à des utilisations précises. Ainsi lors de la construction, de la rénovation ou de l'extension d'une maison. [27]

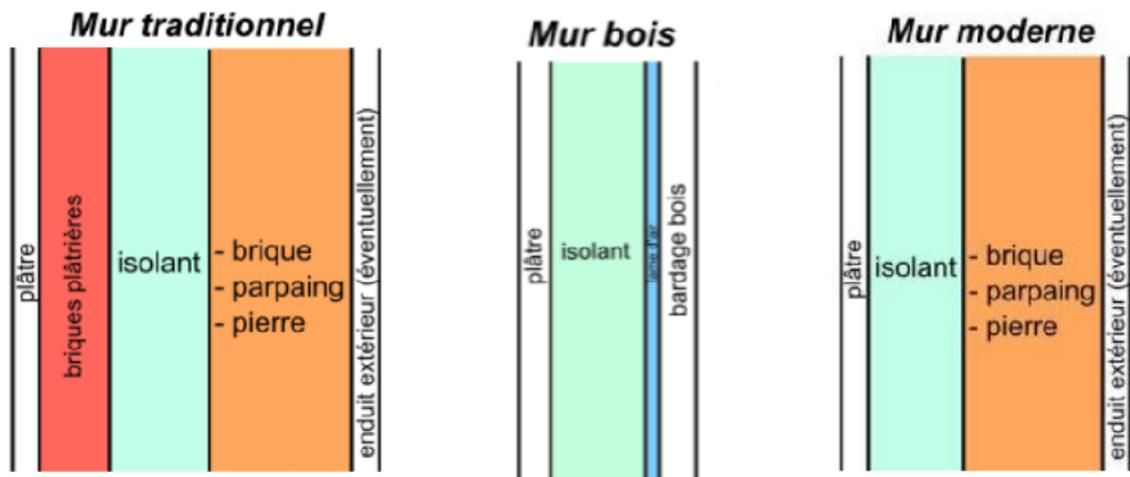


Figure3.5 : Types de murs utilisés généralement [28]

3.3 .2.1 Les types de murs

Il existe différents types de murs en fonction de sa destination au sein de l'habitation :

- **le mur de sous-sol extérieur enterré ou semi-enterré**
Il est utilisé pour la constitution de caves, garages... Sa fonction principale est de supporter les planchers et soutenir les terres humides
- **le mur de façades extérieur**
Il est réalisé avec des portes et fenêtres et a pour principale fonction de protéger des intempéries, d'isoler et d'améliorer l'esthétique
- **le mur de refend intérieur**
Il est prévu pour porter les planchers, les plafonds, la charpente, et divise la surface intérieure habitable en différentes pièces
- **le mur de soutènement**
Il supporte les modifications de terrain, il contient les terres. Il est nécessaire de bien préparer son projet en amont, voire de faire appel à un professionnel, le calcul de la poussée n'étant pas une mince affaire ...
- **le mur de clôture**
Il limite le terrain, embellit l'ensemble et supporte les terres en cas de différence de niveau.

3.3.2.2 Les différents matériaux pour construire un mur

➤ Les murs en pierre

La pierre est un matériau lourd, élever un mur en pierre nécessite des fondations solides. Les moellons (morceaux de pierre) sont tous différents, il est donc important, lors de la construction du mur de choisir les faces extérieures, tout en les positionnant de façon à ne pas avoir de différences dans le mur. Triez vos pierres, les longues seront placées en épaisseur, les régulières en surface, les irrégulières dans la profondeur du mur.

Les fondations doivent être hors gel. Placez un coffrage puis une fois le béton coulé, alternez mortier et fer à béton.

➤ Les murs en parpaing

Le parpaing est un matériau creux, la plupart du temps en béton ou en ciment. Très souvent utilisé pour monter un mur, son élévation peut être laborieuse.

Pour élever un mur en parpaing, il convient de préparer les fondations qui doivent être hors gel. Il est déconseillé de travailler en plein hiver ou en plein été, de préférences pendant les périodes intermédiaires, plus propices aux matériaux (séchage difficile ou accéléré selon le climat).

➤ Les murs en brique

Les briques de mur peuvent avoir plusieurs formats, épaisseurs et être plus ou moins isolantes à choisir en fonction de votre projet. En terre cuite, en béton cellulaire ou en béton léger, monter un mur en brique se fait quasiment comme pour les autres matériaux. La brique monomur est particulièrement appréciée pour ses capacités d'isolation.

Les fondations doivent être préparées, la pose commence en angle directement sur le mortier. Il est conseillé d'appliquer un peu de mortier sur chaque nouvelle brique posée afin d'augmenter l'adhérence et assurer une bonne fixation. Veillez à ce que votre mur soit bien vertical.

➤ Les murs en béton cellulaire

Le béton cellulaire est fabriqué à partir d'eau, de sable, de chaux, de ciment et de poudre d'aluminium. Composé à 80% d'air. Il ne nécessite pas d'ajout d'isolant.

L'élévation d'un mur en béton cellulaire reste classique mis à part qu'à l'instar du mortier, il est utilisé une colle spécifique pour sceller les blocs de béton.

➤ Les murs en bois

Monter un mur en bois peut se faire avec la technique du bois massif empilé. De longues sections de bois sont empilées les unes sur les autres pour former un mur.

Il est également possible, lorsque la charpente de la maison est finie, de placer des panneaux pour le contreventement.

Troisième solution, l'utilisation de panneaux massifs, fabriqués directement en usine et livrés sur place. [27]

Tableau 3.2 : Différentes caractéristiques des matériaux utilisés [27]

| Matériaux | Destination | Isolation | Difficulté de pose |
|------------------|----------------|-----------|--------------------|
| Pierre | Mur de cloison | | |
| | Mur porteur | ** | *** |
| | Mur de clôture | | |
| Parpaing | Mur de cloison | | |
| | Mur porteur | * | *** |
| | Mur de clôture | | |
| Brique | Mur de cloison | | |
| | Mur porteur | ** | *** |
| | Mur de clôture | | |
| Béton cellulaire | Mur de cloison | | |
| | Mur porteur | *** | * |
| | Mur de clôture | | |
| Bois | Mur de cloison | ** | ** |
| | Mur porteur | | |

Tableau 3.3 Caractéristiques thermique des matériaux de construction [31]

| Matériaux | Masse volumique (kg/m³) | Conductivité (W/m.°C) | Capacité thermique (Wh/m³.°C) | Diffusivité (m²/h) |
|--------------------------------------|-------------------------|-----------------------|-------------------------------|-----------------------|
| Béton de granulats | 2300 | 1,75 | 600 | 2,93x10 ⁻³ |
| Brique de terre comprimée (BTC) | 2200 | 1,1 | 517 | 2,13x10 ⁻³ |
| Brique de terre crue | 1800 | 1,1 | 425 | 2,60x10 ⁻³ |
| Brique de terre cuite | 1900 | 1,15 | 455 | 2,53x10 ⁻³ |
| Pierre lourde (granite...) | 2600 | 3,0 | 505 | 5,92x10 ⁻³ |
| Pierre calcaire | 2450 | 2,4 | 490 | 4,90x10 ⁻³ |
| Béton cellulaire | 400 à 800 | 0,16 | 100 | 1,63x10 ⁻³ |
| | | 0,33 | 195 | 1,68x10 ⁻³ |
| Sable sec | 1800 | 0,4 | 395 | 1,01x10 ⁻³ |
| Bois lourds (chêne, hêtre...) | 650 | 0,23 | 435 | 0,53x10 ⁻³ |
| Bois légers (résineux, peupliers...) | 400 | 0,12 | 300 | 0,40x10 ⁻³ |

Lors d'un choix de matériau d'isolation, il est intéressant, dans une démarche d'éco construction, de ne pas limiter ses critères de choix aux seules performances thermiques du matériau.

- Propriétés thermiques : elles sont généralement décrites par des notions telles que la conductibilité thermique (W/m^2K). Petit à petit, on tend vers une description intégrant les propriétés de masse des matériaux isolants. Par exemple, on parle de plus en plus souvent de l'effusivité thermique (la racine carrée du produit de la masse volumique, de la conductivité thermique et de la chaleur spécifique du matériau). Elle représente la vitesse à laquelle la température de surface d'un matériau varie, et donc sa capacité à accumuler et restituer de la chaleur (inertie thermique). Utilisée en combinaison avec la conductibilité thermique, cette grandeur est intéressante lorsque l'on évoque les isolants massifs.
- Propriétés techniques : le comportement au feu, la perméabilité à la vapeur d'eau, le comportement à l'humidité, le type de mise en œuvre, la stabilité dans le temps, l'isolation acoustique, etc.
- Propriétés environnementales : impact énergétique de la production, du transport, risques pour la santé, maintenance, traitement en fin de vie (recyclage) etc. Ces propriétés sont identifiables par des données centralisées tels que les écobilans. Ces derniers mettent en avant les résultats d'analyse de différents impacts environnementaux relatifs aux produits de construction. L'analyse des impacts est transversale, elle intègre l'ensemble du cycle de vie des produits. Parmi les critères analysés nous retrouvons : les émissions de gaz à effet de serre ; la production de gaz acidifiants ; l'origine des ressources (renouvelable, non-renouvelable) ; l'économie des ressources ; la production de déchets ; toxicité pour l'eau et les êtres humains...etc.
- Propriétés économiques : coût du matériau, de sa mise en œuvre et selon le cas de sa maintenance, en rapport avec le type d'utilisation et les performances à atteindre.[29]



Figures 3.6 : Isolant traditionnels : laine de roche, laine de verre, verre cellulaire, perlite expansée.[29]

Les isolants classiques sont de deux types : organiques, (polyuréthanes, polystyrènes et polyesters) et inorganiques (laines de verre et de roche)



Figure 3. 7: De gauche à droite : mousse de polyuréthane, mousse de polystyrène expansé, mousse de polystyrène extrudé, laine de roche, laine de verre, mousse résol [29]

Pour l'isolation de la salle, nous avons opté pour:

- Des panneaux denses de laine minérale (épaisseur- 140 mm) pour le sol et les fondations.
- Des panneaux souples de laine de bois (épaisseur- 220 mm) en sous toiture.
- Trois cent (300) mm de ouate de cellulose pour le plafond et 200 mm pour le plancher des chambres.
- Des murs à ossature de bois ($U = 0,16 \text{ W/m}^2$) avec un indice d'isolation phonique supérieur à 46 db.
- Double vitrage de 20 mm avec un volume intérieur rempli de gaz ($U = 1.1$) et un indice d'isolation phonique de 31 db. [30]

3.3.3 Composante de mur trombe

Ce dispositif est constitué d'une baie vitrée située à quelques centimètres à l'extérieur d'un mur en béton exposé au sud. La face extérieure du mur en béton est peinte en noir. Le mur Trombe est un mur capteur qui possède en plus des ouvertures horizontales hautes et basses qui permettent à l'air de la pièce de se réchauffer en circulant dans la zone "chaude" située entre le mur en béton et le vitrage. La coupe latérale d'un mur capteur à l'allure suivante:

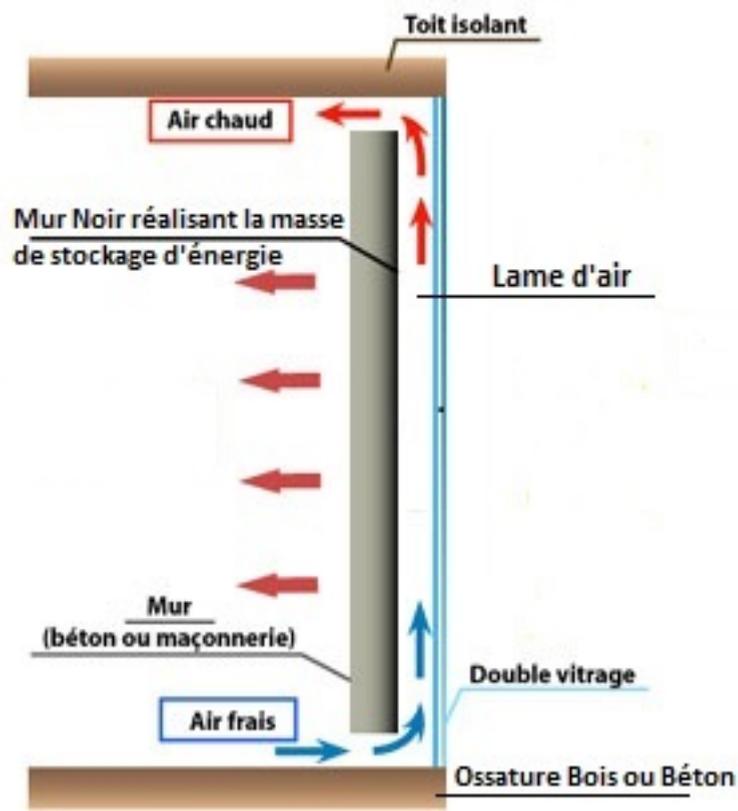


Figure 3. 8: Composants Mur Trombe

3.4. Etude d'une cavité couplée avec le mur trombe

L'étude d'une cavité couplée avec le mur trombe faite par le moyen de la simulation numérique se basant sur le solveur Fluent pour étudier qualitativement l'aspect dynamique et thermique de la salle .

3.4.1. Présentation de Gambit et Fluent

La simulation est effectuée par le logiciel fluent qui lui-même fonctionne à partir du logiciel Gambit.

Le logiciel Gambit est un meilleur 2D/3D; préprocesseur qui permet de mailler des domaines de géométrie d'un problème de CFD (Computational Fluid Dynamics). Il génère des fichiers*.msh pour Fluent. Fluent est un logiciel qui permet de résoudre et simuler des problèmes de mécanique des fluides et de transferts thermiques par la méthode des volumes finis.

Gambit regroupe trois fonctions :

- Définition de la géométrie du problème.
- Le maillage et sa vérification.
- la définition des frontières (Types de conditions aux limites) et définitions des domaines de calculs.

3.4.1.1. Présentation de Gambit

Démarrage de Gambit :

Le chemin de l'application de Gambit est le suivant :

`:/Fluent.Inc/ntbin/ntx86/Gambit.exe`

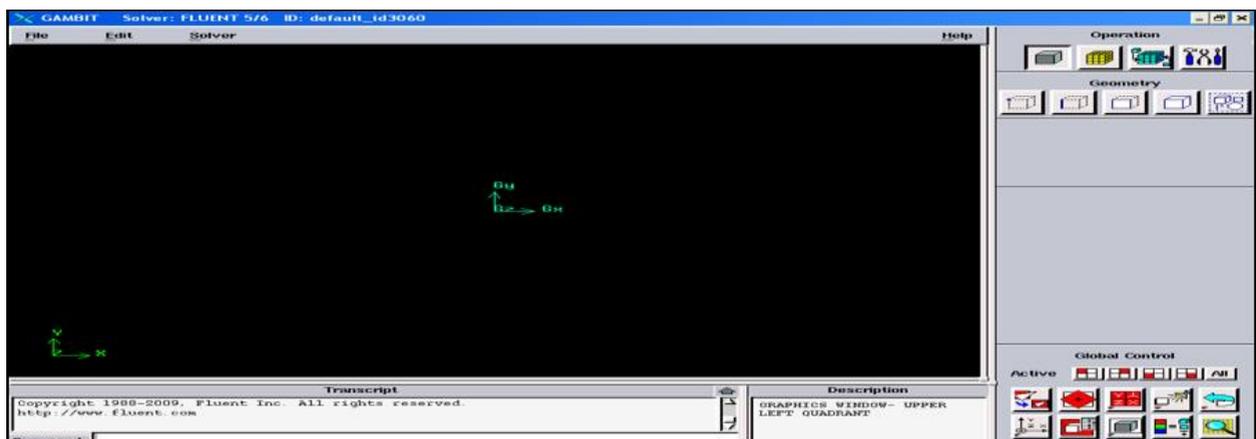


Figure 3.9 : Lancement du Gambit

Construction de la géométrie :

La finalité de la construction de la géométrie est de définir les domaines de calcul qui seront des faces dans un problème 2D et des volumes dans un problème 3D.

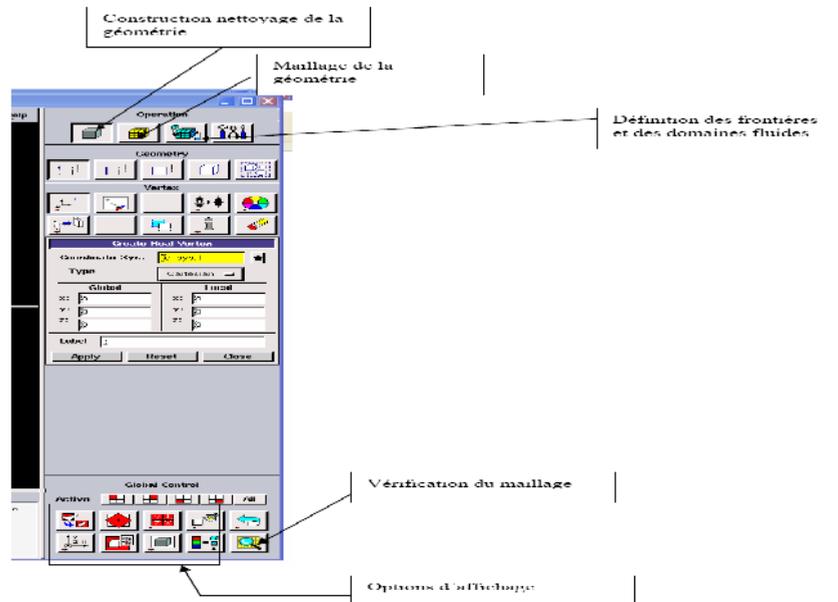


Figure 3.10 : Construction de la géométrie

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. Ce menu permet de mailler en particulier une ligne de la géométrie, à savoir disposer les nœuds avec des conditions particulière (utilisation d'un ratio pour modifier la pondération du maillage, application de formes différentes 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 :

- Economique en nombre d'éléments, présente un nombre inférieur de maille par rapport à un maillage non structuré équivalent.
- Réduit les risques d'erreurs numériques car l'écoulement est aligné avec le maillage.

Les 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. Les inconvénients sont :

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.

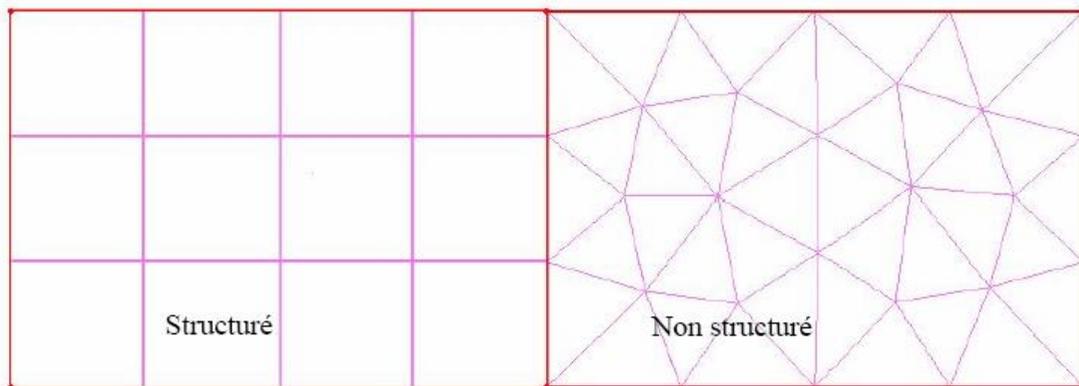


Figure 3. 11 : Maillage structuré et non structuré

➤ **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 :

Combine entre les avantages du maillage structuré et ceux du maillage non structuré.

➤ **Définition des frontières**

Sélectionner dans le menu « **Solver** » le type du solveur « **FLUENT5/6** » puis définir les frontières.

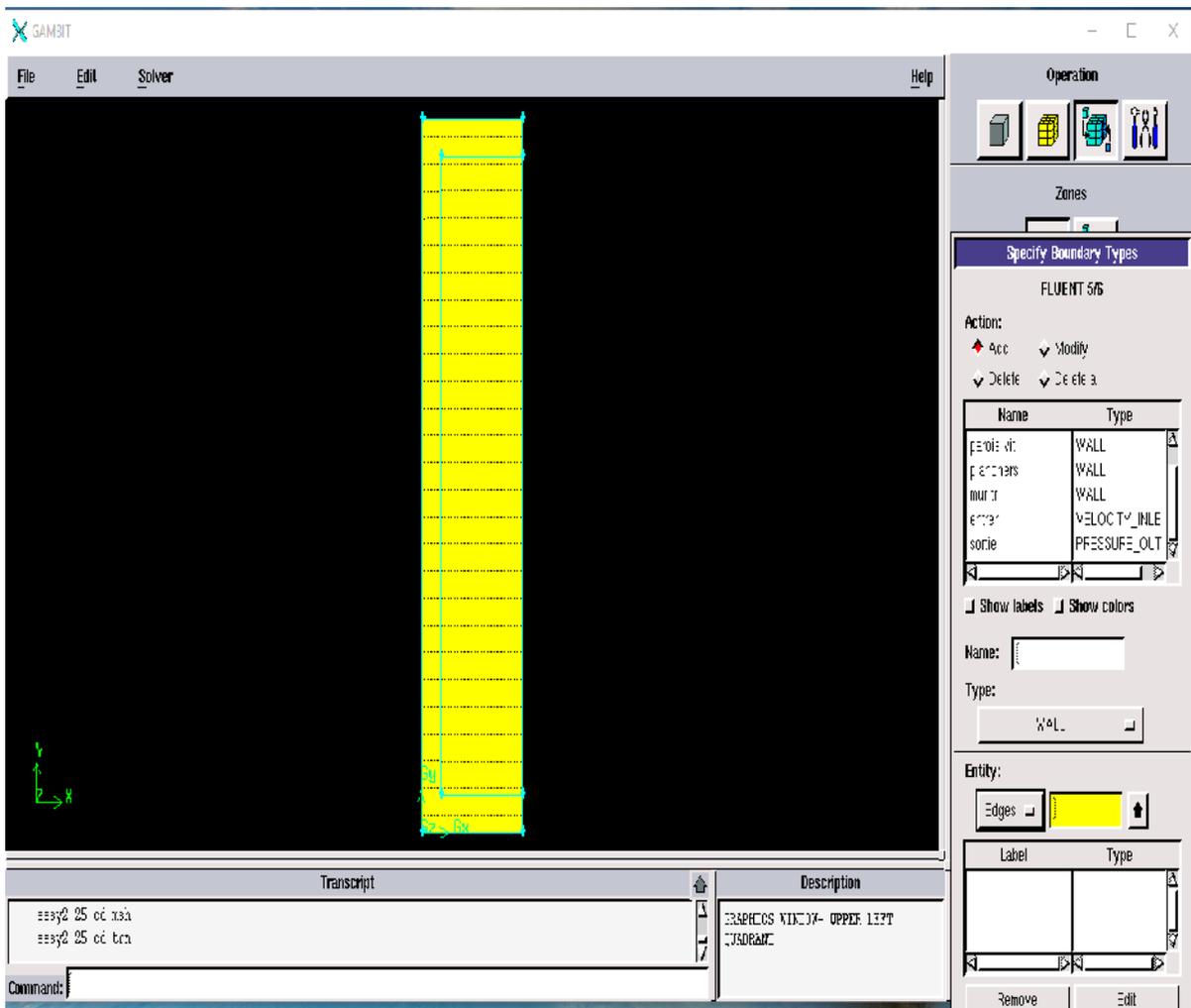


Figure 3.12 : Définition des frontières

➤ **Exportation du maillage**

Le maillage peut être alors exporté dans un fichier pour lecture avec FLUENT.

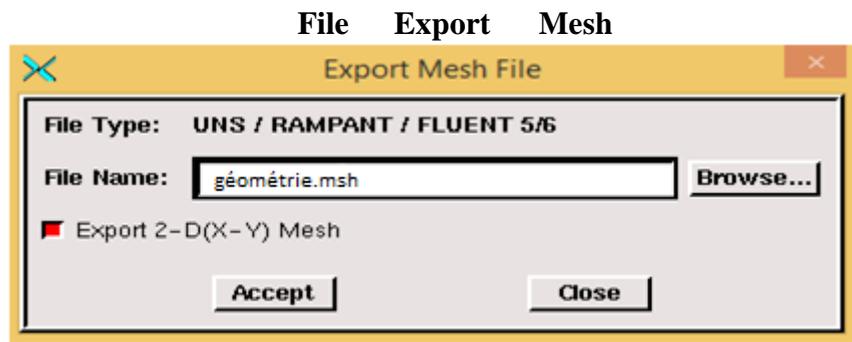


Figure 3. 13: Exportation du maillage

Donner un nom au fichier et sélectionner le maillage “2-D”, puis sauvegarder le fichier Gambit :

File Save As

3.4.1.2. Présentation de Fluent

➤ Importation de la géométrie

Pour commencer la simulation il faut importer le fichier (*.msh) généré sous Gambit.

File → Read → Case...

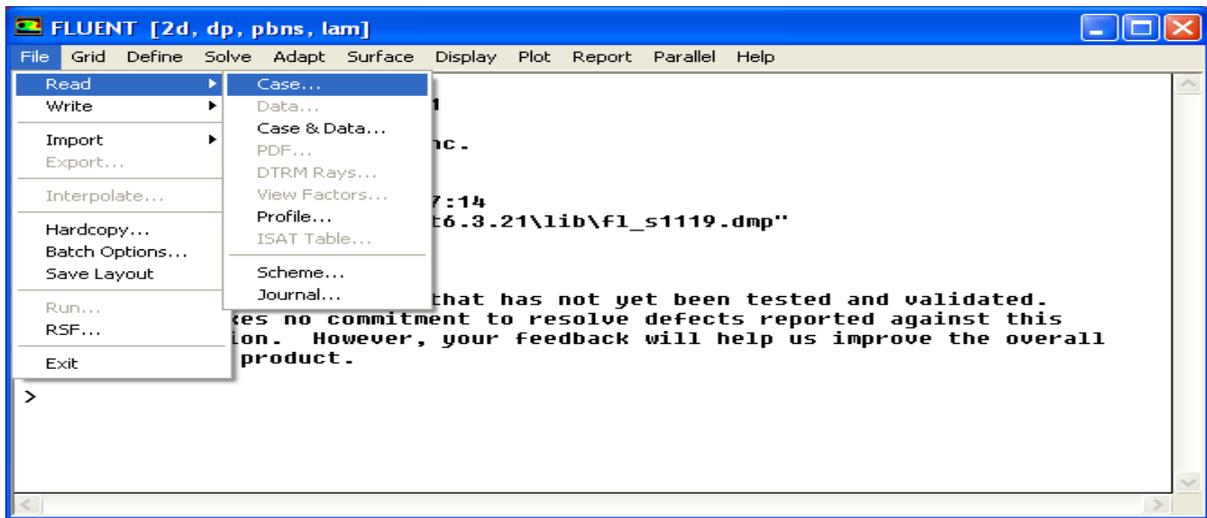


Figure 3. 14 : Importation de la géométrie

Ceci permet de vérifier si le maillage importé ne contient pas d’erreurs ou de volumes négatifs.

➤ Vérification du maillage importé

Grid → Check

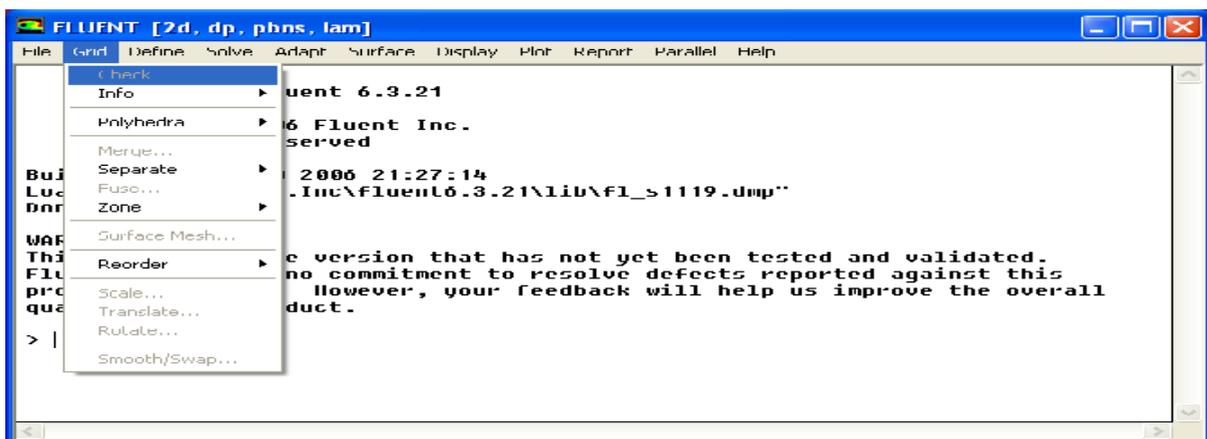


Figure 3. 15 : Vérification du maillage

➤ Vérification de l'échelle

Grid → Scale

Il faut toujours vérifier que les dimensions affichées correspondent aux dimensions physiques du problème.

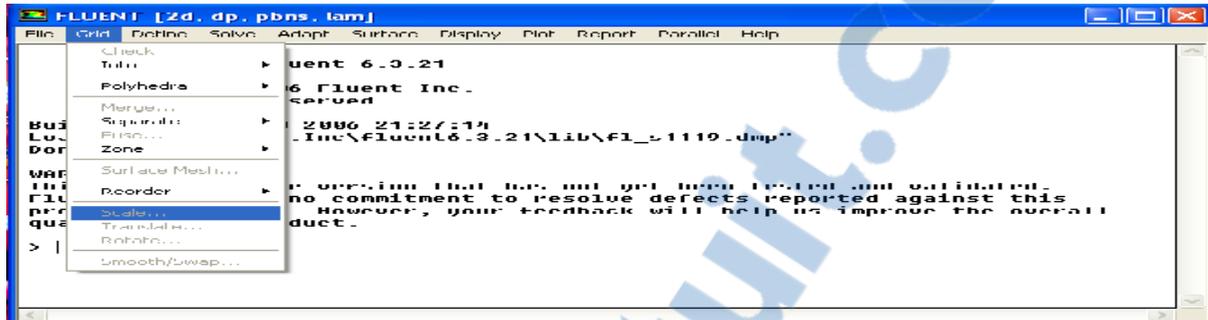


Figure 3. 16: Vérification des unités

➤ Choix du solveur

Define → Models → Solver...

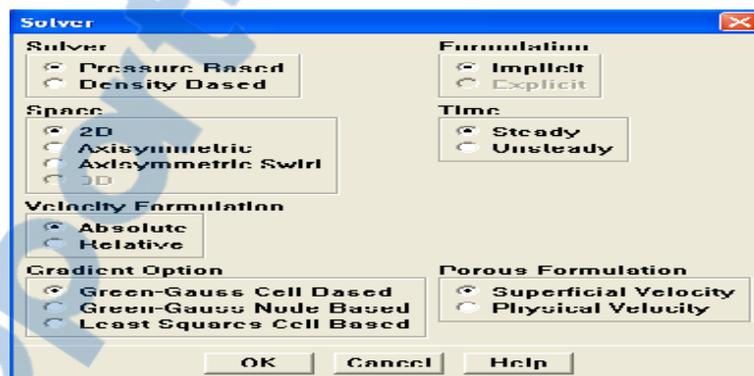


Figure 3. 17: Choix du solveur

- **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.

➤ L'équation de l'énergie

Define → Models → Energy...

L'instruction énergie doit être activée pour l'étude du champ thermique

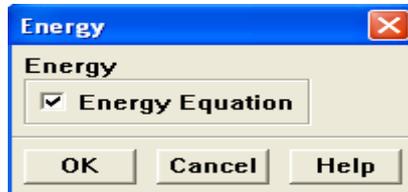


Figure 3. 18 : Equation de l'énergie

➤ 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

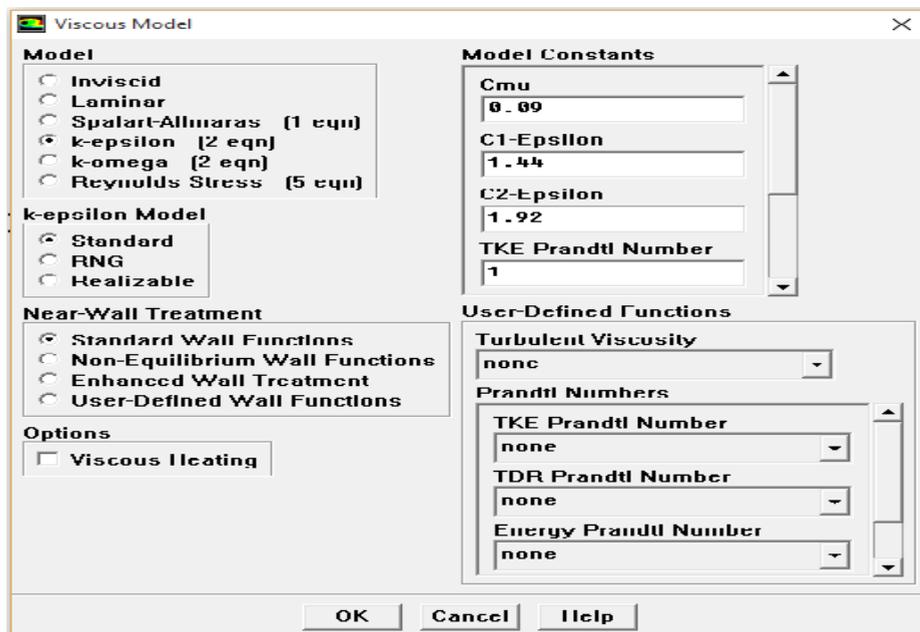


Figure 3. 19 : Choix du modèle d'écoulement

➤ Définition des caractéristiques du fluide

Define → Materials

Les caractéristiques du fluide sont chargées à partir de la bibliothèque de données de Fluent.

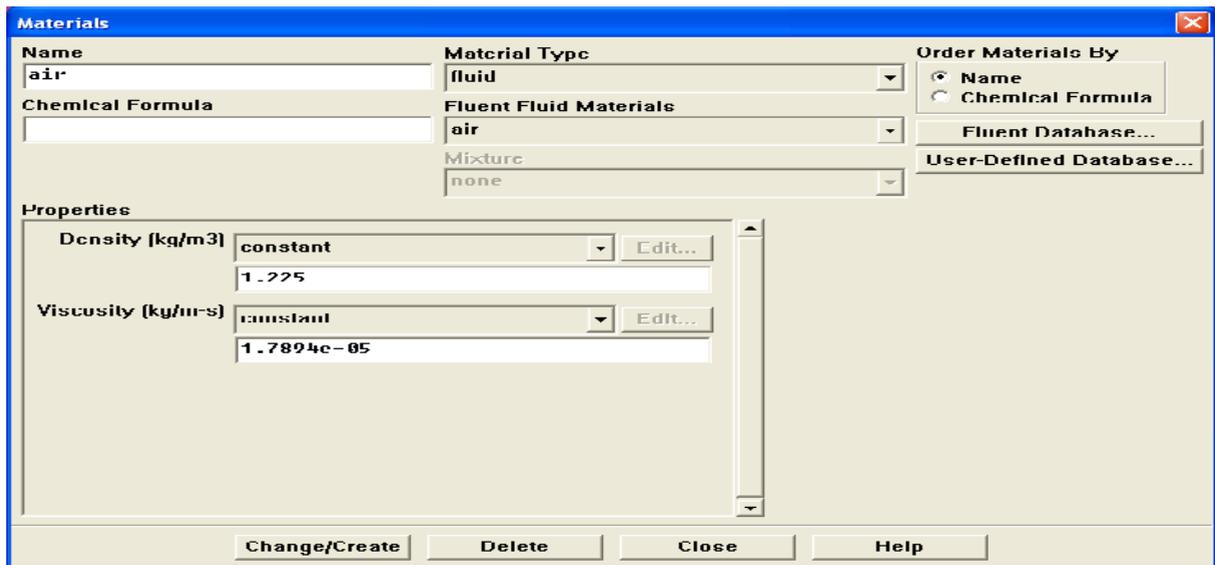


Figure 3. 20 : Définition des caractéristiques du fluide

➤ 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 ».

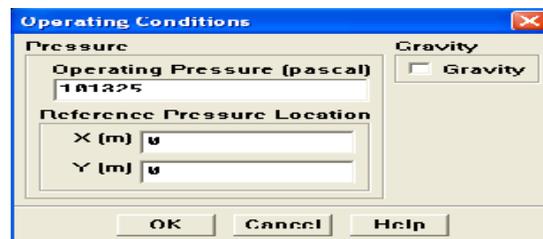


Figure 3. 21 : Choix de la pression de référence

Conditions aux limites

Define → Boundary Conditions

Ensuite, il faut fixer les valeurs des conditions aux limites.

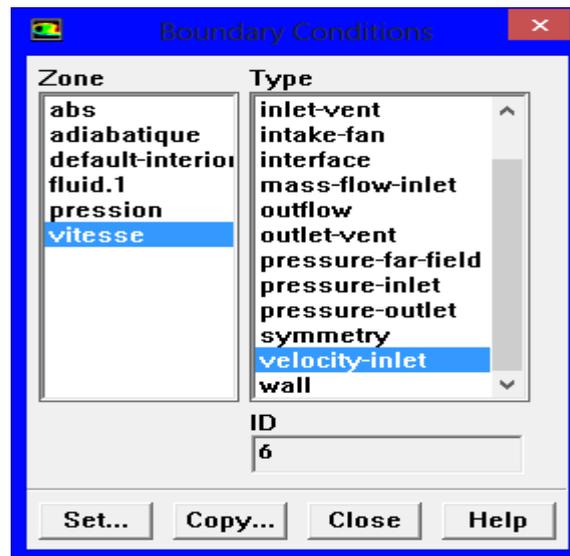


Figure 3. 22 : Valeurs des conditions aux limites

➤ **Velocity inlet**

Utilisée pour des écoulements incompressibles ou moyennement compressibles, quand la Vitesse d'entrée est connue.

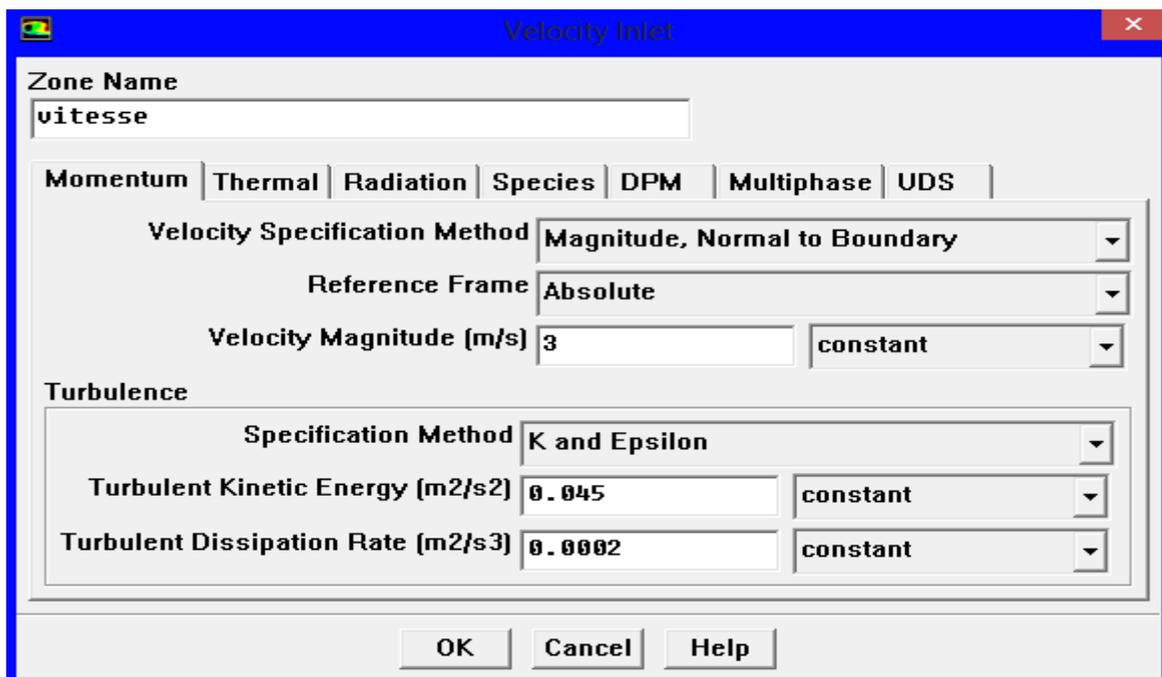


Figure 3. 23 : Vitesse d'entrée

- Wall

Il est utilisé pour délimiter les régions solides des régions fluides

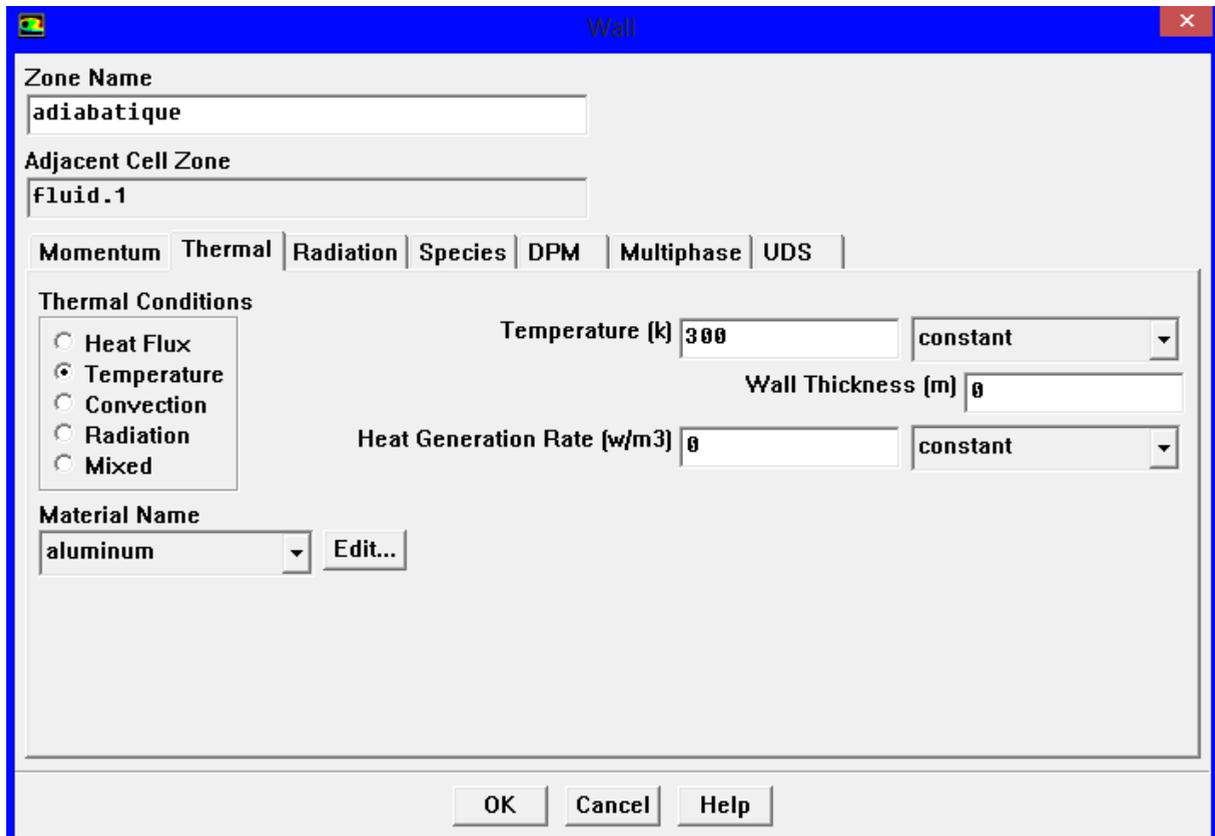


Figure 3. 24 : Parois inférieure et supérieure

- Pressure Outlet

Spécifier la pression statique de sortie.

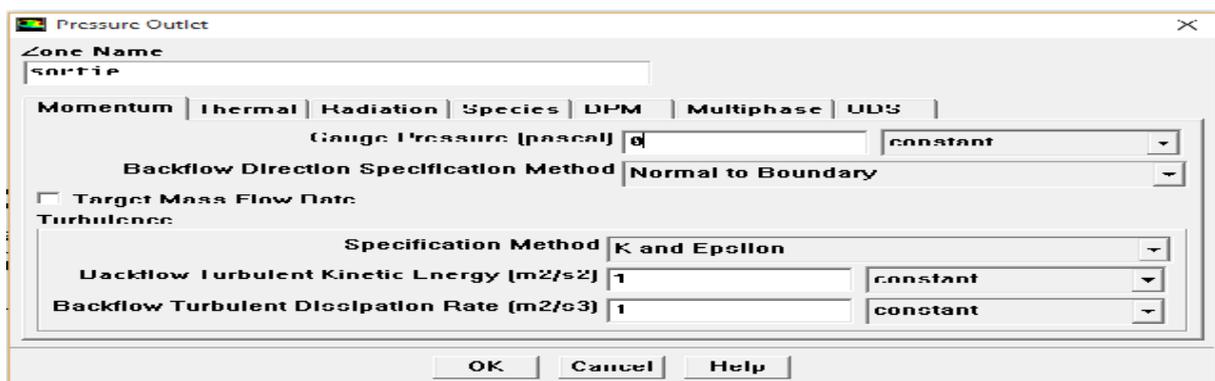


Figure 3. 25 : Pression à la sortie

- **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.

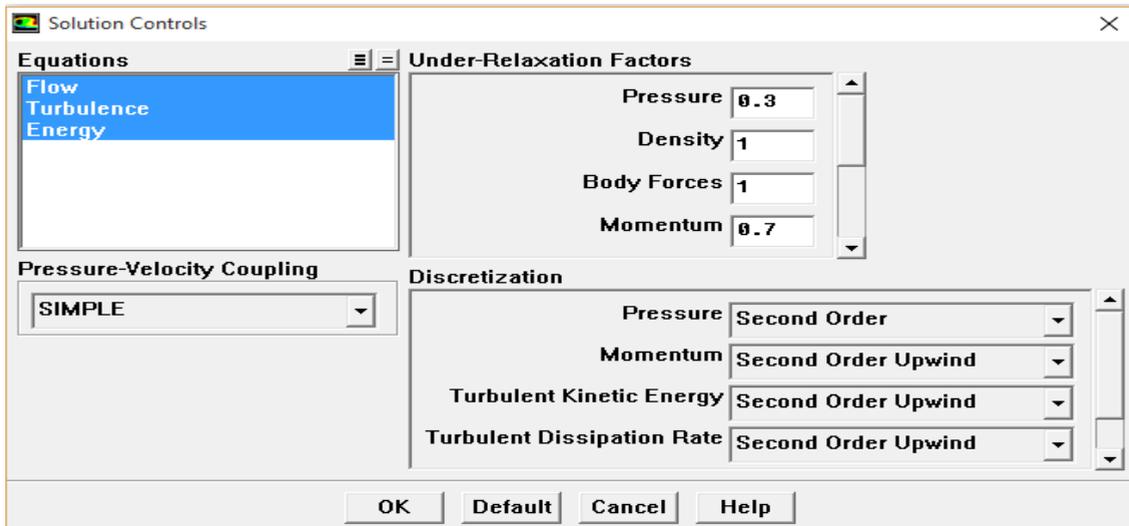


Figure 3. 26 : Choix d'ordre des équations et l'algorithme

- **Initialisation**

Solve → Initialize → Initialize...

Cette fonction permet d'initialisé le calcul.

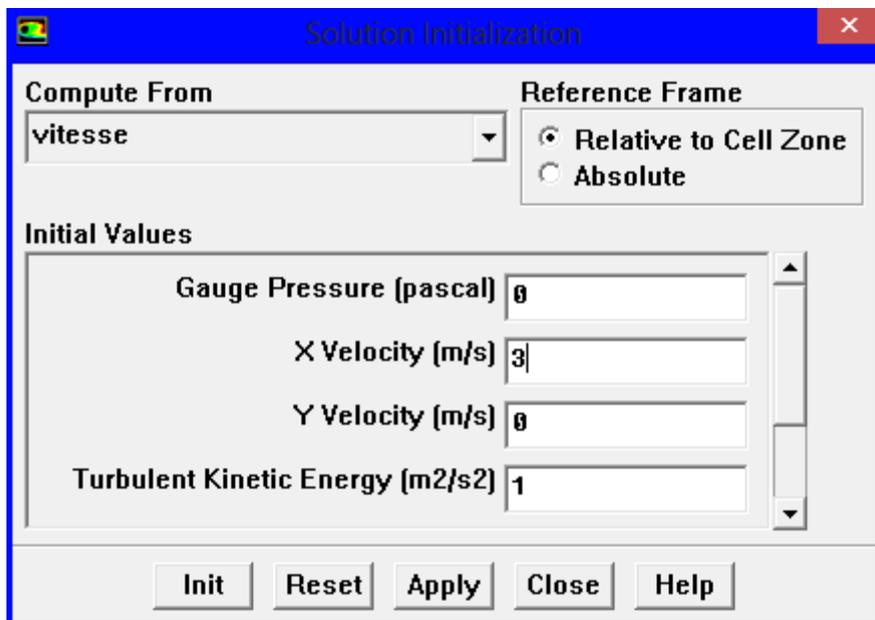


Figure 3. 27: Initialisation du calcul

Il s'agit ici de choisir les critères qui doivent être vérifiés pour que les calculs de la simulation s'arrêtent.

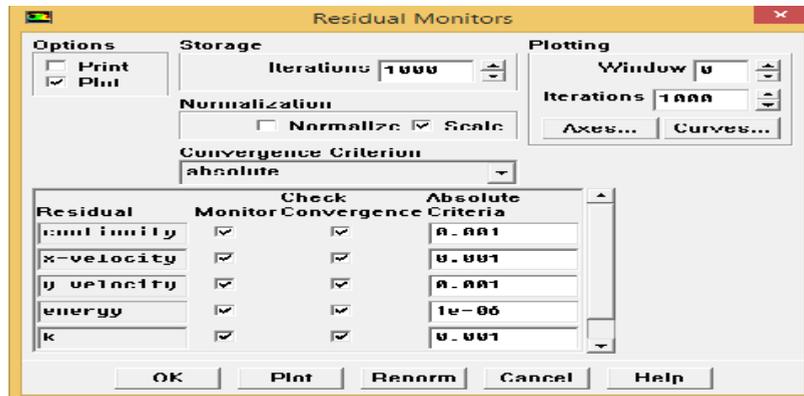


Figure 3. 28 : Choix des critères de convergence

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.

- **Lancement du calcul**

Solve —> Iterate....

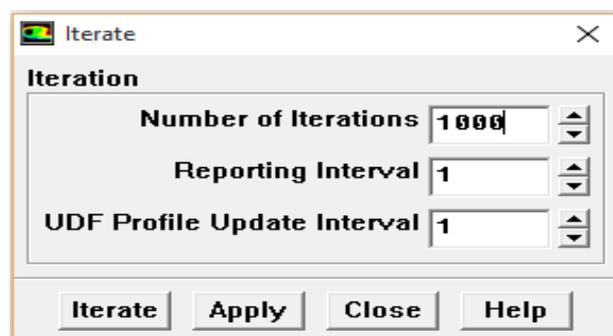


Figure 3. 29 : Choix du nombre des itérations

3.4.2. Simulation et interprétation des résultats

3.4.2.1. Simulation d'une cavité

Le but de notre étude est le chauffage d'une cavité par un mur trombe.

➤ **Description de la géométrie :**

➤ **Géométrie d'un mur trombe :**

Par construction, le simple vitrage, la lame d'air emprisonné entre le vitrage et le mur en béton ainsi que le mur en béton ont des dimensions communes :

Longueur L : 3,00 m

Hauteur h : 2,2 m.

l'épaisseur des diverses couches varie.

Le simple vitrage a pour épaisseur : $e_{\text{verre}} = 4,00$ mm

Le mur en béton a pour épaisseur : $e_{\text{béton}} = 20,0$ cm

La lame d'air emprisonné a pour épaisseur : $e_{\text{air}} = 8,0$ cm.

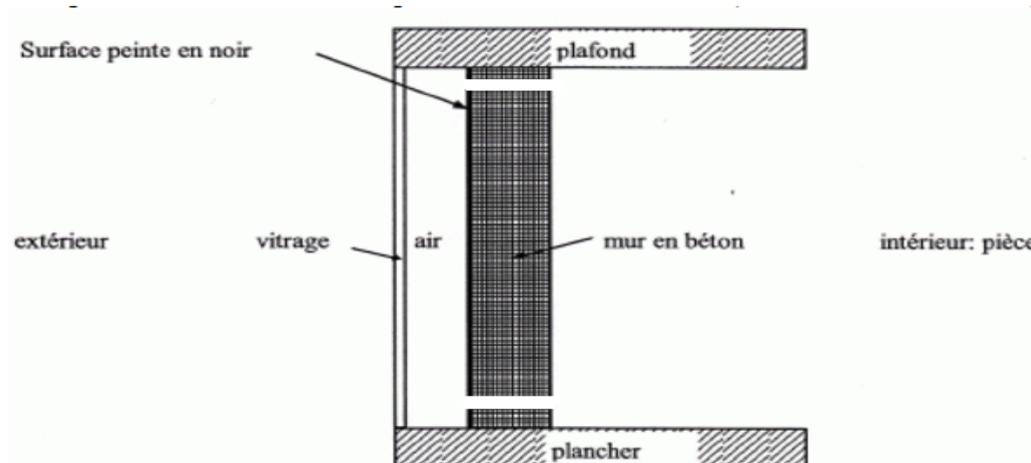


Figure 3.30 : Géométrie mur trombe

➤ **Géométrie de la cavité étudiée :**

- a) la longueur de la salle : $L4 = 3 \text{ m}$;
- b) la sortie de l'air froid : $H3 = 10 \text{ cm}$;
- c) l'entrée de l'air chaud : $H1 = 10 \text{ cm}$;
- d) la hauteur de la salle : $H = 3 \text{ m}$.

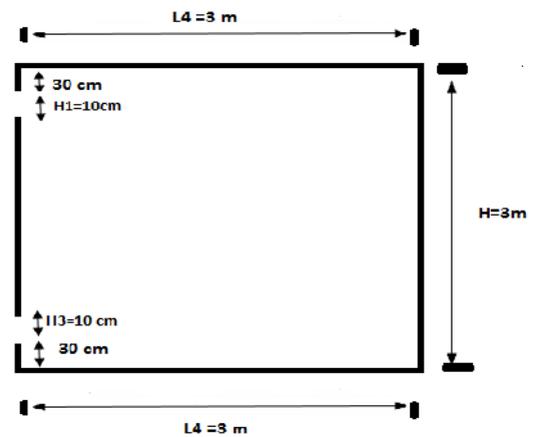


Figure 3.31. : Géométrie étudiée (la salle)

Conditions de simulations :

De nombreux résultats sont obtenus en faisant varier la quantité de flux de chaleur et la vitesse d'entrée d'air.

On impose deux flux de chaleur et deux vitesses d'écoulements différentes :

Les flux : 1000 ; 500 [w/m²]

Les Vitesses : 1,5 ; 3 [m/s]

➤ **Les conditions aux limites :**

Pour la salle :

A la paroi : $T = 300 \text{ K}$

A la sortie : $P = 10^5 \text{ Pa}$

On étudie quatre cas de configuration :

Tableau 3. 4 : Température de l'entrée de la salle

| Q (w/m ²) \ V(m/s) | 1000 | 500 |
|--------------------------------|----------------------|----------------------|
| 3 | 1 ^{er} cas | 3 ^{eme} Cas |
| 1,5 | 2 ^{eme} Cas | 4 ^{eme} Cas |

1^{er} cas : Q=1000 w/m² et V= 3 m/s

Champ de Vitesse :

La figure 3. 32 Représente le Contours d'amplitude de la vitesse pour la salle.

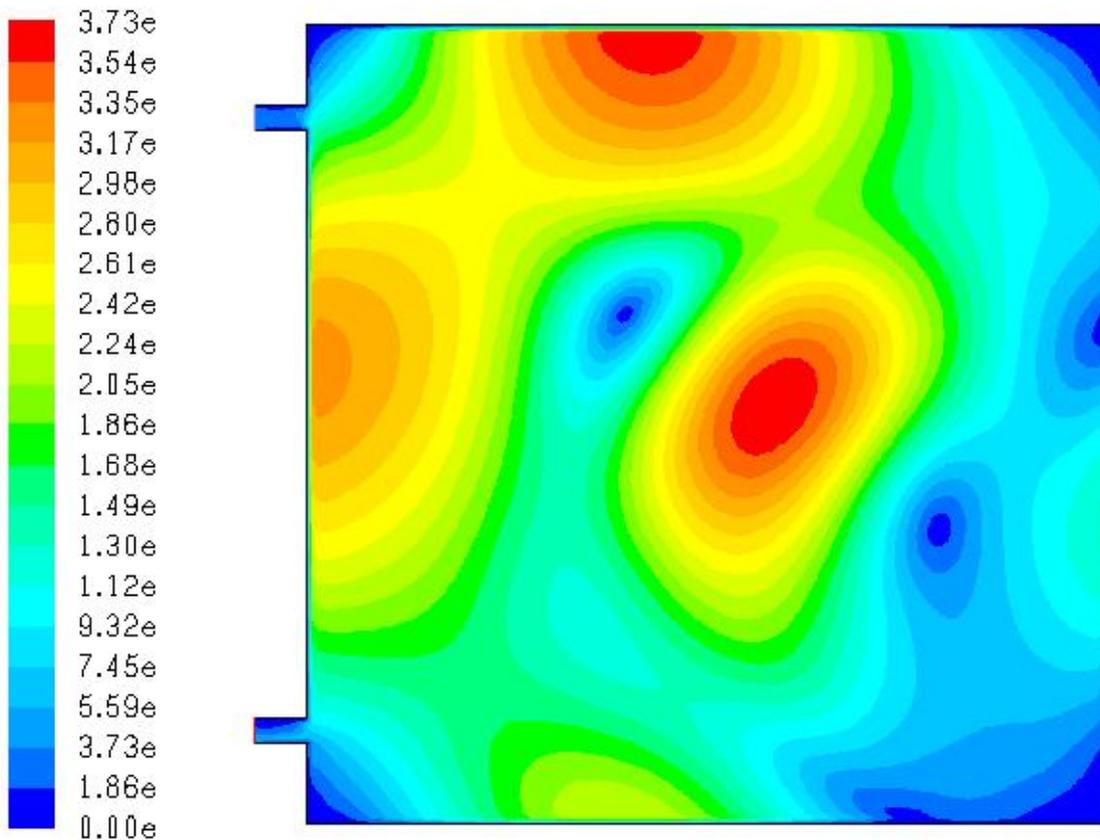


Figure 3.32 : Amplitude de la vitesse (Q=1000 w/m² et V= 3 m/s)

On constate que la vitesse prend sa valeur maximal au niveau de la paroi en contact avec le mur trombe et au plafond ainsi au milieu de la salle et moyenne au sol et des valeurs nuls dans les coins

La Figure 3. 33 Représente le graphe de la position en fonction de l'amplitude de la vitesse

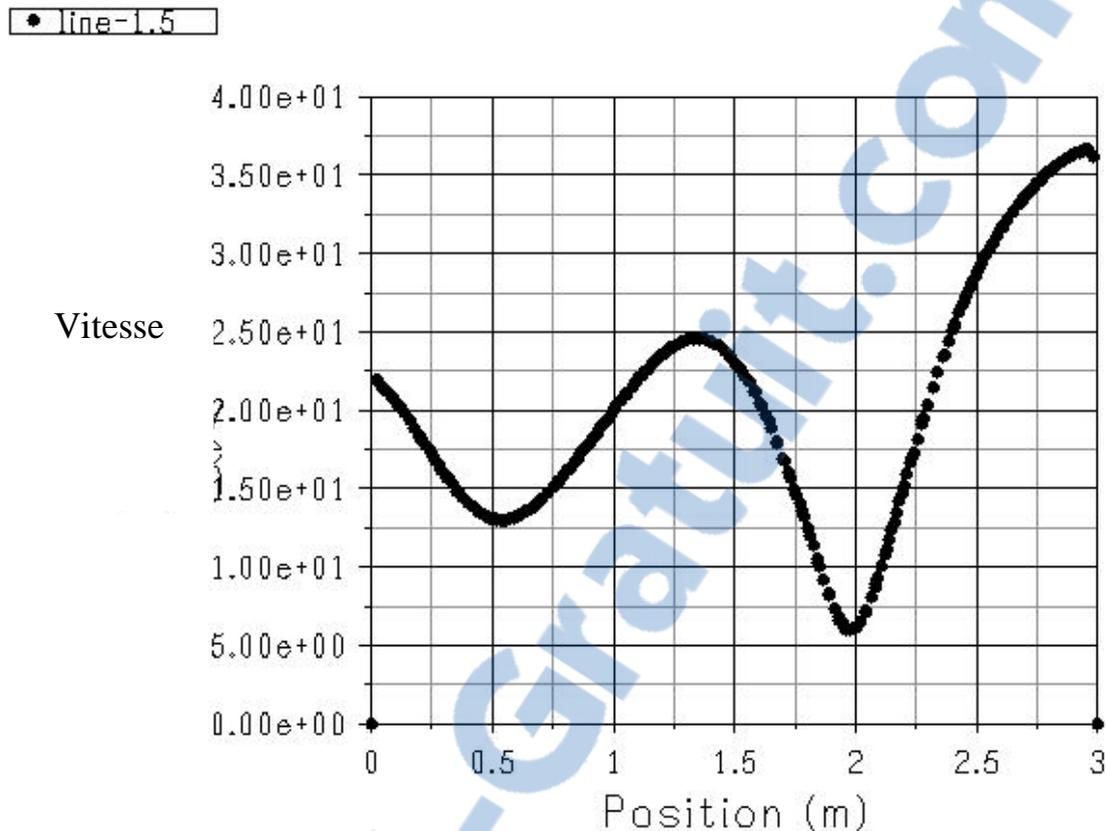
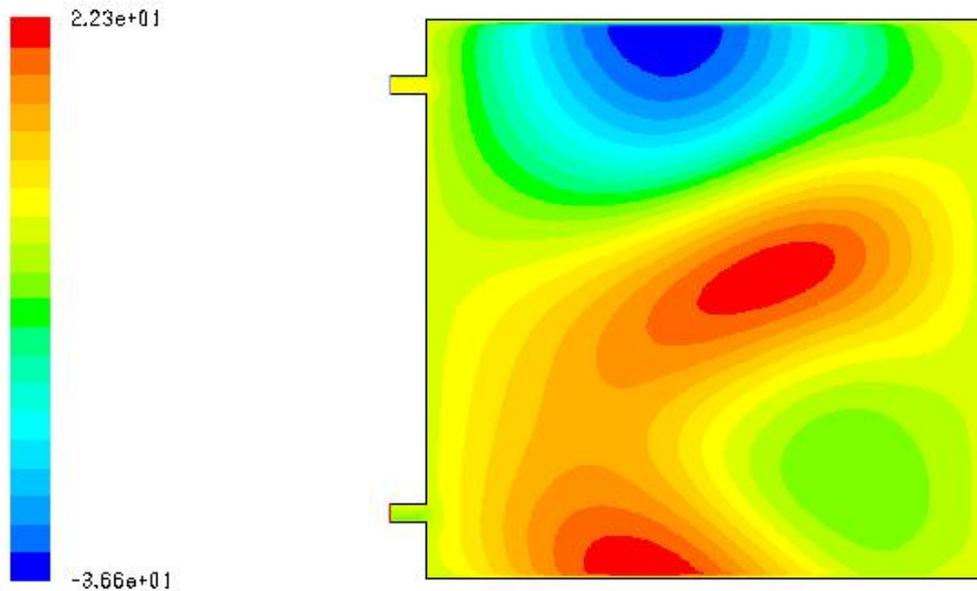


Figure 3.33 : Graphe de la position en fonction de l'amplitude de la vitesse ($Q=1000 \text{ w/m}^2$ et $V= 3 \text{ m/s}$)

A la position 0 on remarque que la valeur de vitesse est moyenne et diminue puis augmente et diminue jusqu'à une valeur minimale puis elle augmente jusqu'à sa valeur maximale vers la fin de la salle.

La figure 3.34 représente le Contours de Vitesse longitudinale pour la salle



Figures 3.34 : Contours de Vitesse longitudinale ($Q=1000 \text{ w/m}^2$ et $V= 3 \text{ m/s}$)

On remarque que la vitesse prend sa valeur maximale au milieu et au sol de la salle et minimale au plafond et moyenne a l'entrée et sortie de la salle.

La figure 3.35 représente la Vitesse transversale pour la salle.

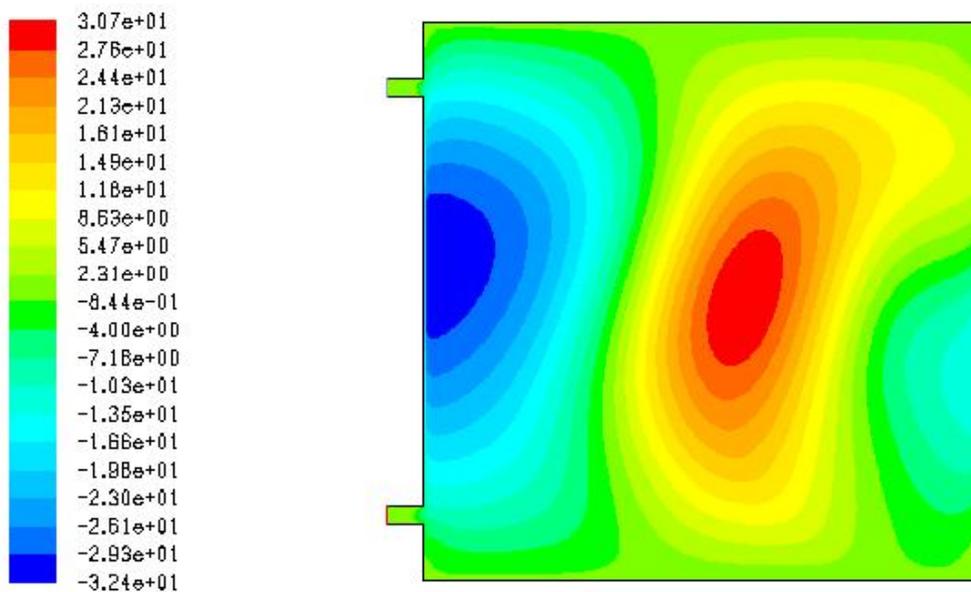


Figure 3.35 : Vitesse transversale ($Q=1000 \text{ w/m}^2$ et $V= 3 \text{ m/s}$)

On remarque que la vitesse est minimale au niveau de la paroi en contact avec le mur trombe et prend sa valeur maximale au milieu de la salle et elle est moyenne a l'entrée et la sortie de la salle.

La figure 3.36 représente le Contours des lignes de courant au niveau de la salle

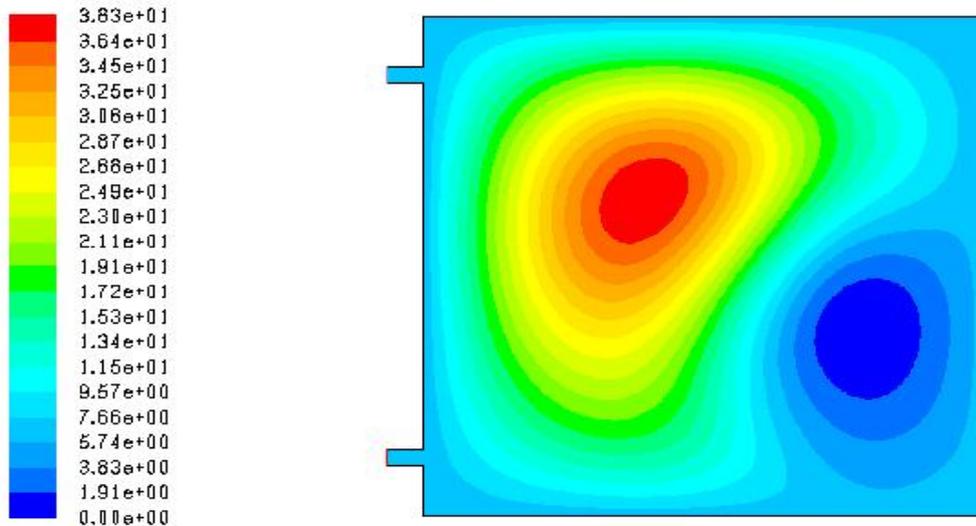
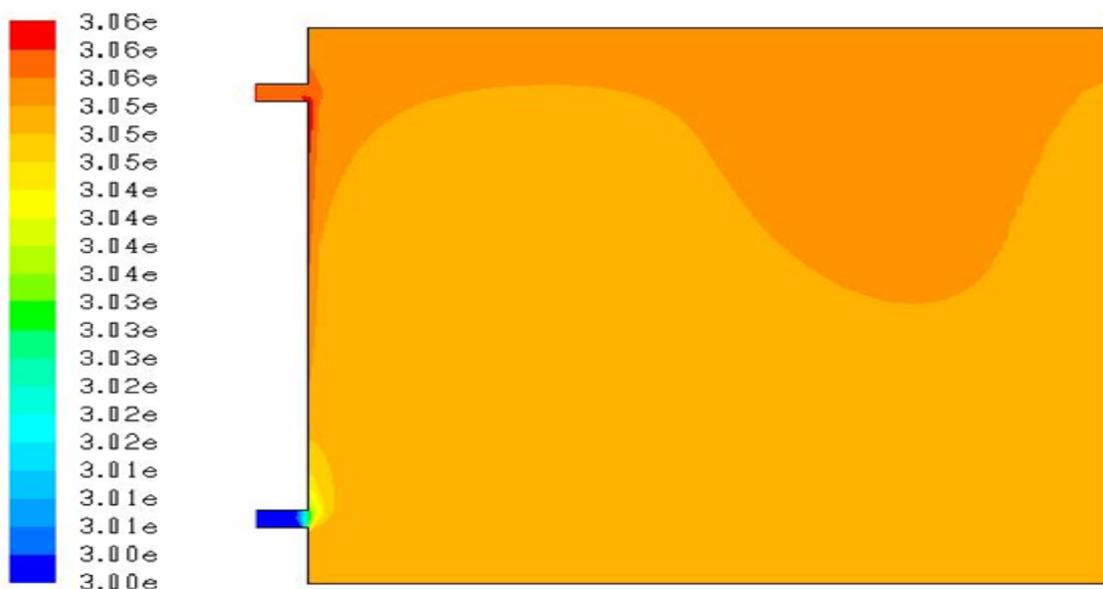


Figure 3.36 : Contours des lignes de courant ($Q=1000 \text{ w/m}^2$ et $V= 3 \text{ m/s}$)

La vitesse est maximale au milieu et nulle à la fin de la salle et moyenne dans les parois.

Champs de température :

La figure 3.37 représente le Contours de température au niveau de la salle



La figure 3.37 : Contours de température ($Q=1000 \text{ w/m}^2$ et $V= 3\text{m/s}$)

On remarque que la température au niveau de l'entrée de la salle et a sa partie supérieur est maximale et uniforme dans sa partie inférieur puis diminue a la sortie de salle.

Champs de turbulence :

La figure 3.38 représente le Contours de l'énergie cinétique turbulente, les lignes de K la salle

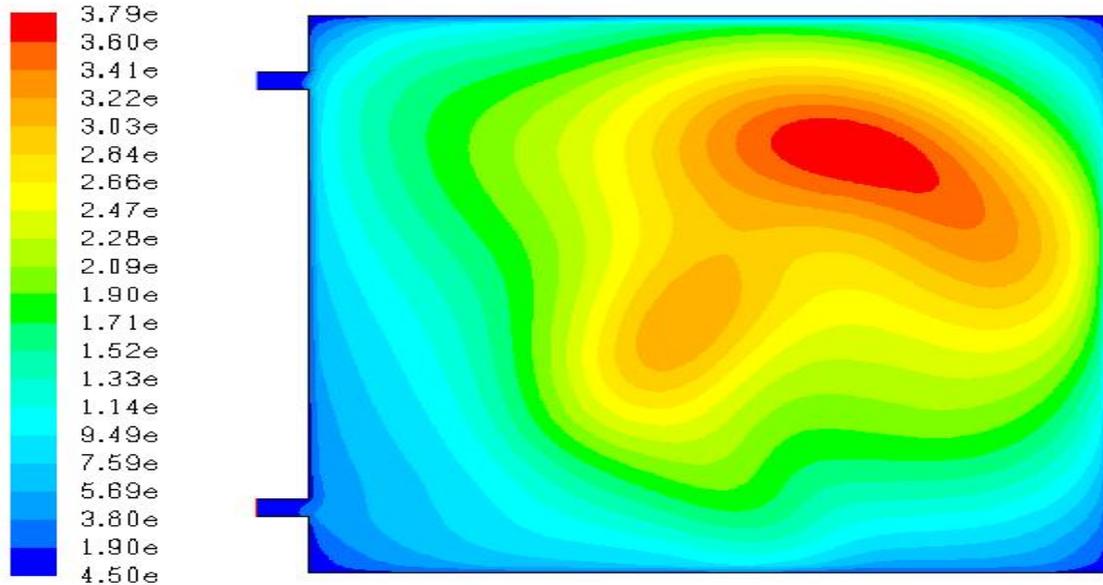


Figure 3.38 : Energie cinétique turbulente ($Q=1000 \text{ w/m}^2$ et $V= 3 \text{ m/s}$)

On constate que la valeur de l'énergie cinétique turbulente est minimale à l'entrée et la sortie et aux parois de la salle et augmente au milieu jusqu'à sa valeur maximale

La figure 3.39 Représente le Taux de dissipation epsilon pour la salle.

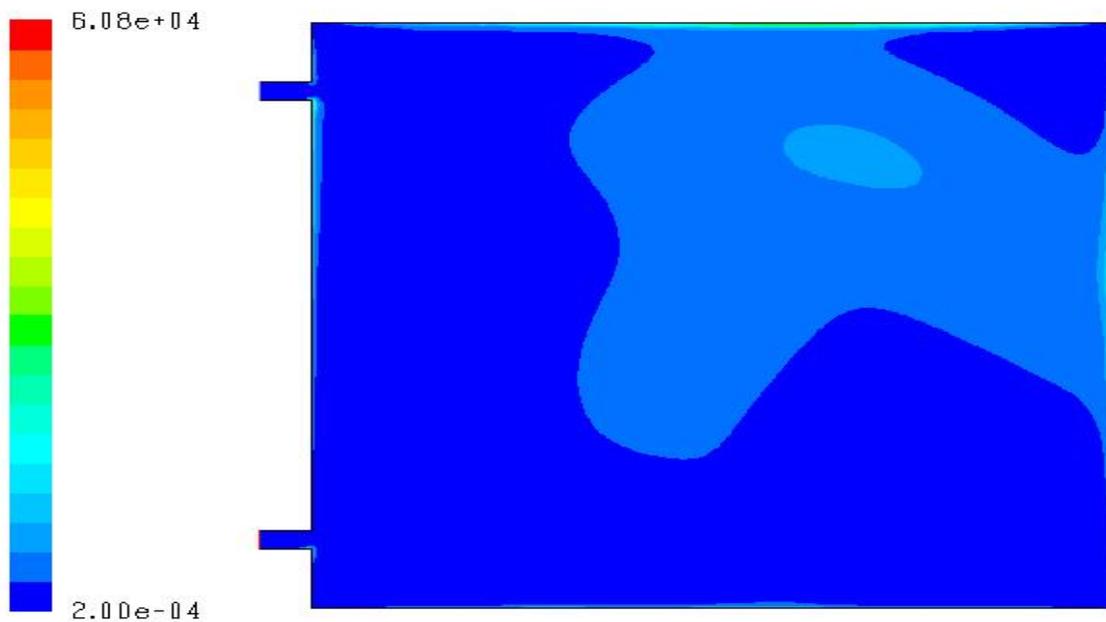


Figure 3.39 : Représente le Taux de dissipation epsilon pour la salle. ($Q=1000 \text{ w/m}^2$ et $V= 3 \text{ m/s}$)

On remarque que le Taux est minimale et uniforme a l'entrée et sortie et prend sa valeur maximal au plafond et la fin de la salle.

2^{ème} Cas : ($Q=1000 \text{ w/m}^2$ et $V= 1,5 \text{ m/s}$)

Champ de Vitesse :

La figure 3. 40 Représente le Contours d'amplitude de la vitesse pour la salle.

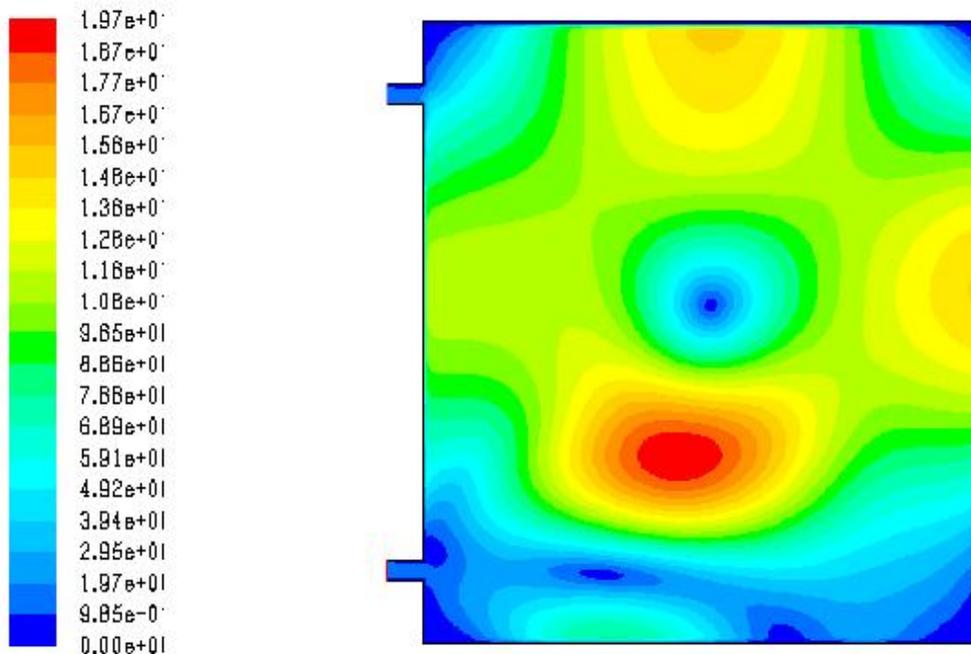


Figure 3.40 : Le Contours d'amplitude de la vitesse pour la salle ($Q=1000 \text{ w/m}^2$ et $V= 1,5 \text{ m/s}$).

On remarque que la vitesse prend sa valeur maximale au niveau de la paroi en contact avec le mur trombe et au plafond et la fin de la salle ainsi au milieu de la salle et moyenne au sol et des valeurs nuls dans les coins.

La Figure 3.41 Représente le graphe de la position en fonction de l’amplitude de la vitesse

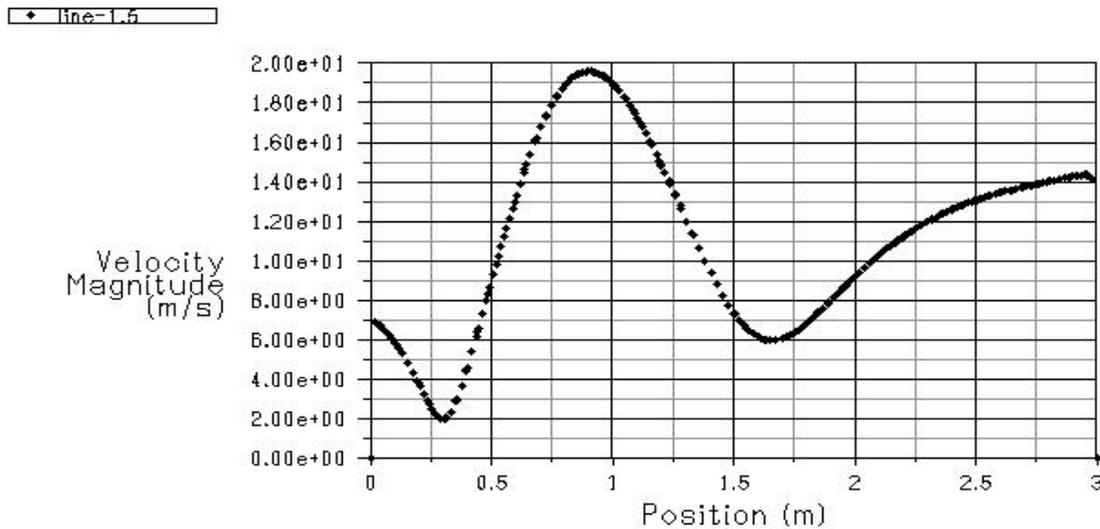
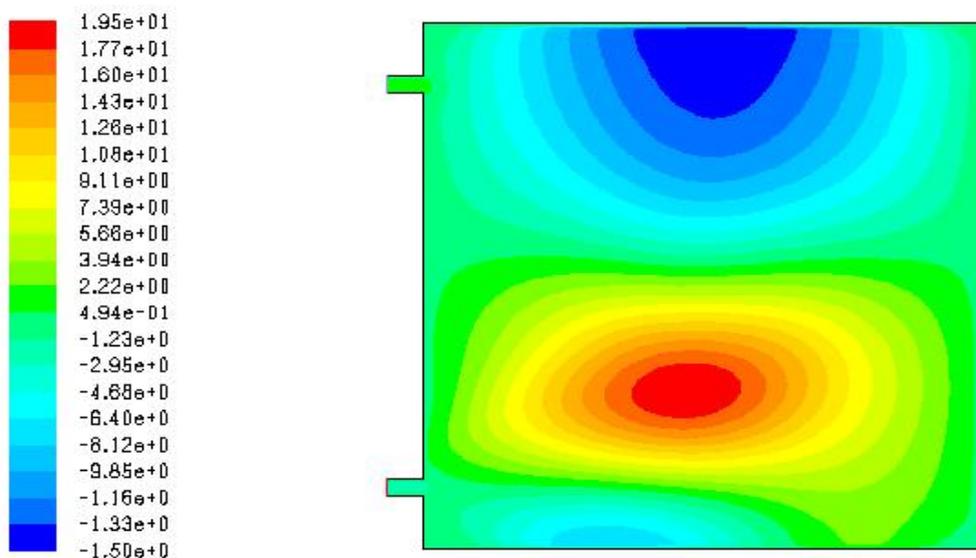


Figure 3.41 : Graphe de la position en fct de l’amplitude de la vitesse ($Q=1000 \text{ w/m}^2$ et $V= 1,5 \text{ m/s}$).
 A la position 0 la vitesse est minimale et continue de diminuer jusqu'à une valeur minimale puis elle augmente à 1m de la salle jusqu'à sa valeur maximale puis diminue au milieu et augmente encore à une valeur assez élevé vers la fin de la salle.

La figure 3.42 représente le Contours de Vitesse longitudinale pour la salle



Figures 3.42 : Contours de Vitesse longitudinale ($Q=1000 \text{ w/m}^2$ et $V= 1.5 \text{ m/s}$)

On remarque que la vitesse prend sa valeur maximal au milieu de la salle et minimale au plafond et moyenne a l’entrée et sortie de la salle.

La figure 3.43 représente la Vitesse transversale pour la salle.

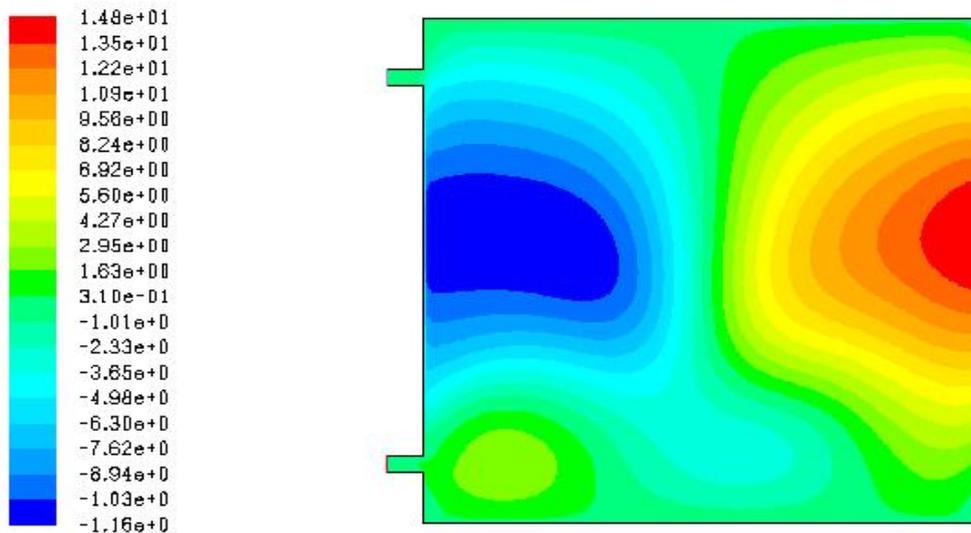


Figure 3.43 : Vitesse transversale ($Q=1000 \text{ w/m}^2$ et $V= 1.5 \text{ m/s}$)

On remarque que la vitesse est nul au niveau de la paroi en contact avec le mur trombe et prend sa valeur maximale a la paroi parallèle et elle est moyenne a l'entrée et la sortie de la salle

La figure 3.44 représente le Contours des lignes de courant au niveau de la salle

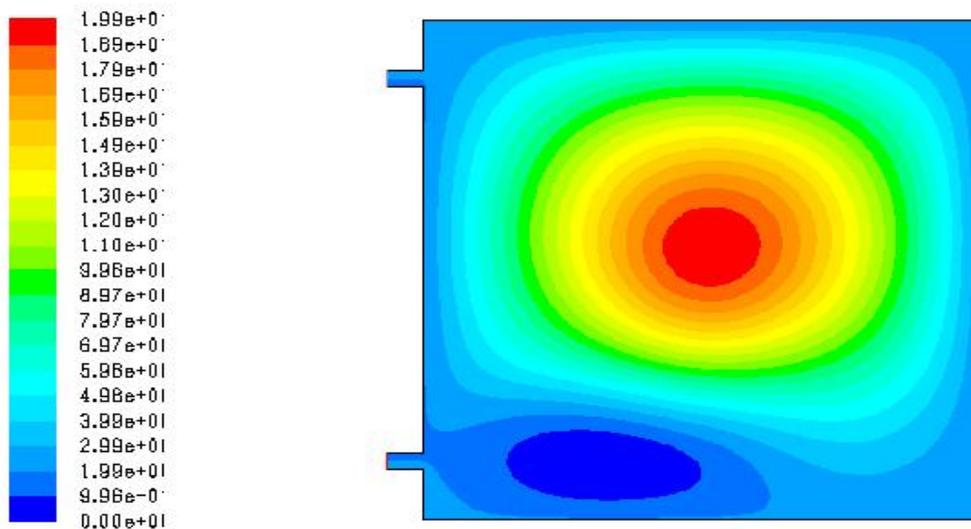
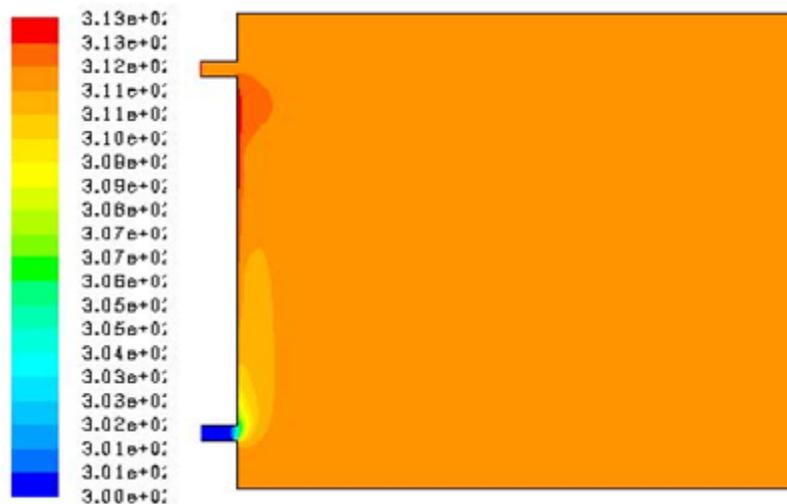


Figure 3.44 : Contours des lignes de courant ($Q=1000 \text{ w/m}^2$ et $V= 1.5 \text{ m/s}$)

La vitesse est maximale au milieu de la salle et minimale dans les parois de la salle

Champs de température :

La figure 3.45 représente le Contours de température au niveau de la salle



La figure 3.45 : Contours de température ($Q=1000 \text{ w/m}^2$ et $V= 1.5 \text{ m/s}$)

On remarque que la température atteint sa valeur maximale au niveau de la paroi en contact avec le mur trombe et elle est uniforme à l'entrée et dans toute la salle puis prend une valeur minimale à la sortie

Champs de turbulence :

La figure 3.46 représente le Contours de l'énergie cinétique turbulente, les lignes de K la salle

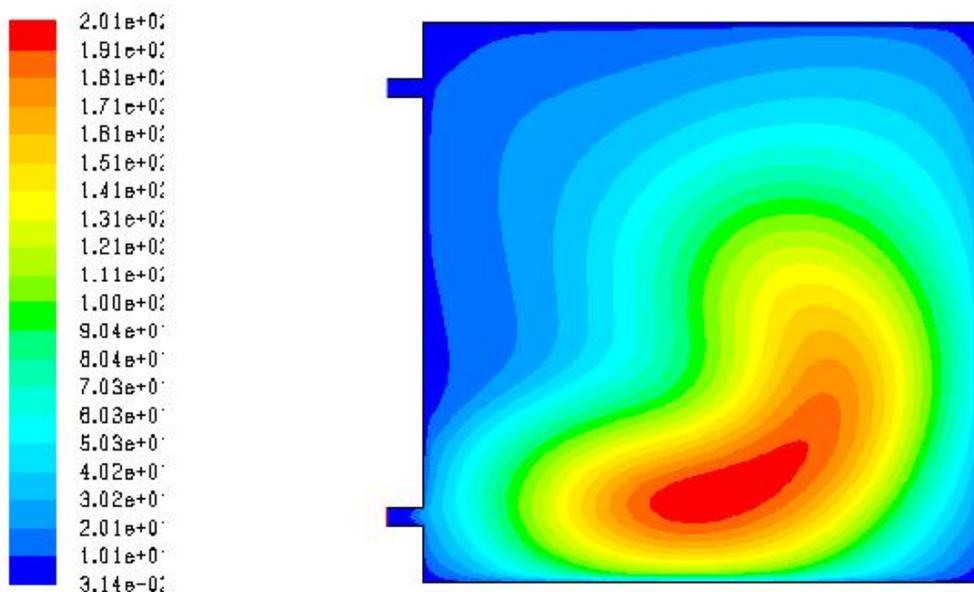
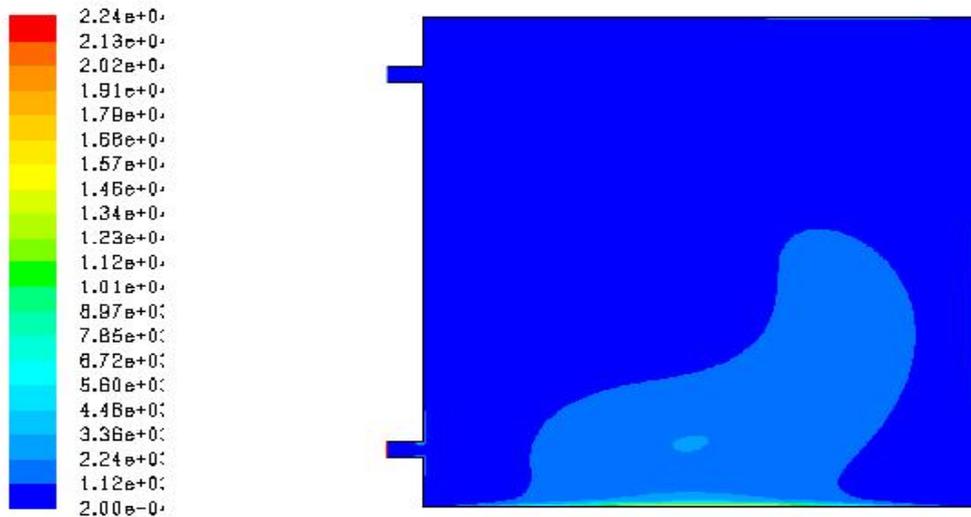


Figure 3.46 : Energie cinétique turbulente ($Q=1000 \text{ w/m}^2$ et $V= 1.5 \text{ m/s}$)

On constate que la valeur de l'énergie cinétique turbulente est minimale à l'entrée et la sortie et aux parois de la salle et augmente au bas milieu jusqu'à sa valeur maximale

La figure 3.47 Représente le Taux de dissipation epsilon pour la salle.



La figure 3.47 : Représente le Taux de dissipation epsilon pour la salle. ($Q=1000 \text{ w/m}^2$ et $V= 1.5 \text{ m/s}$)

On remarque que le Taux est uniforme et prendre sa valeur maximal au bas milieu du sol

3^{ème} Cas : $Q= 500 \text{ w/m}^2$ et $V= 3 \text{ m/s}$

Champ de Vitesse :

La figure 3. 48 Représente le Contours d'amplitude de la vitesse pour la salle.

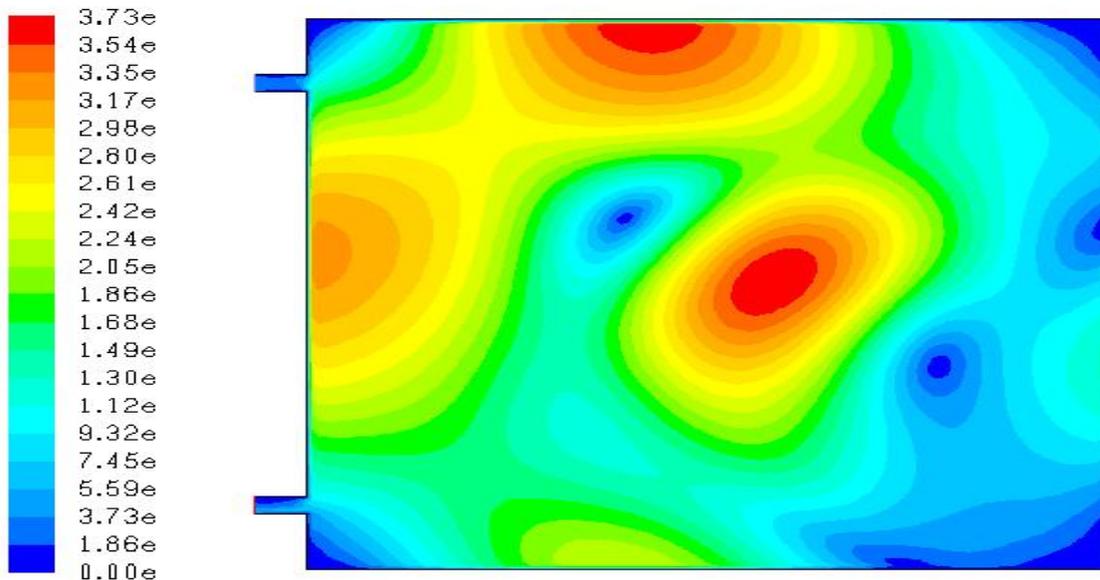


Figure 3. 48 : Le Contours d'amplitude de la vitesse pour la salle ($Q=500 \text{ w/m}^2$ et $V= 3 \text{ m/s}$).
Aucun changement avec le premier cas ($Q=1000 \text{ w/m}^2$ et $V= 3 \text{ m/s}$).

La Figure 3.49 Représente le graphe de la position en fonction de l'amplitude de la vitesse

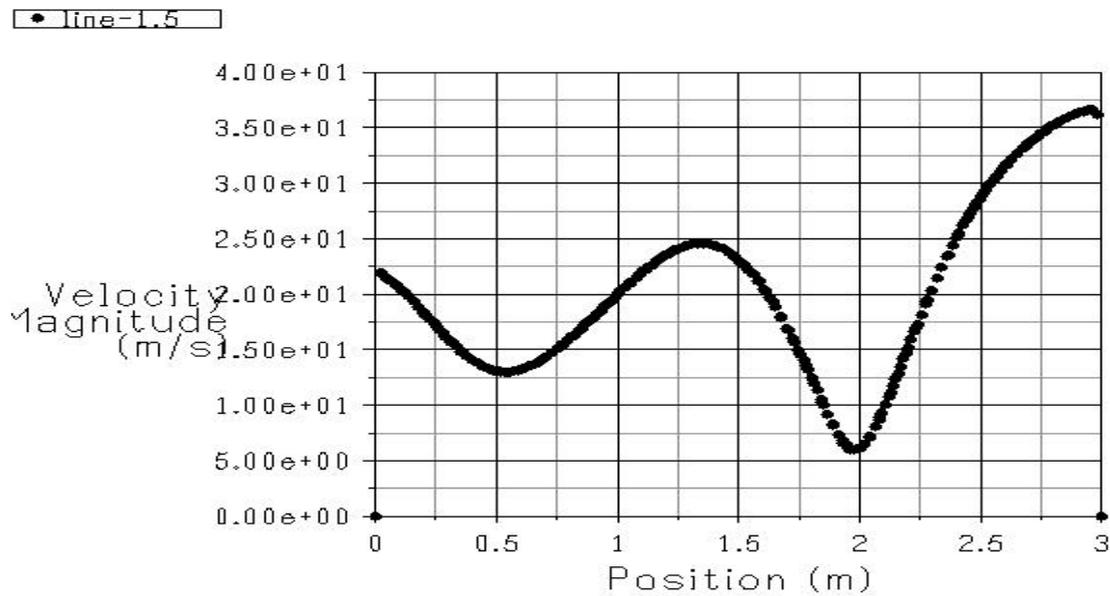
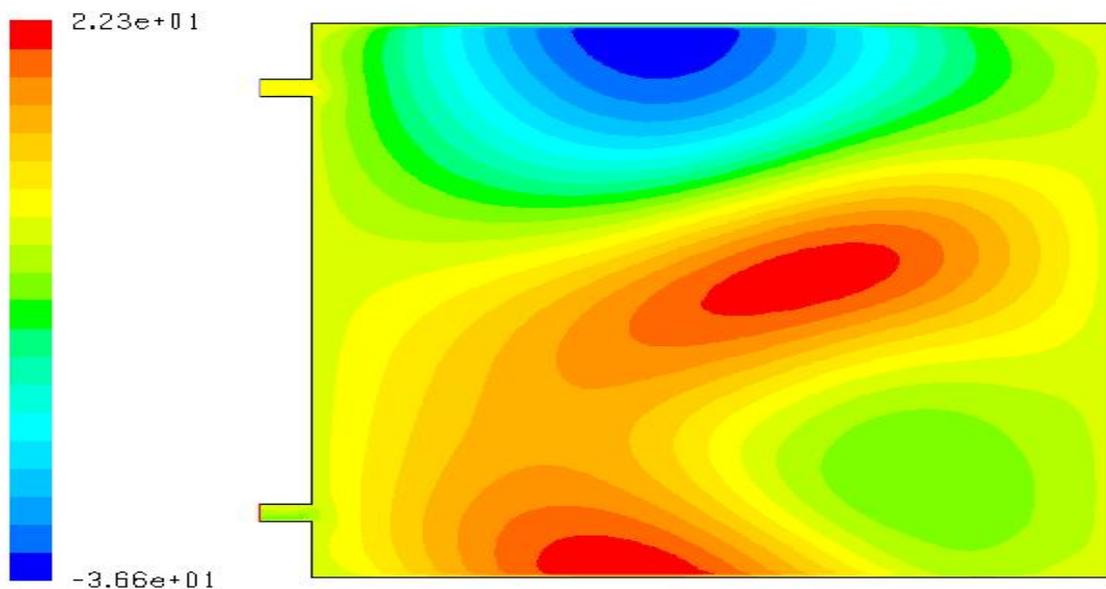


Figure 3.49 : Graphe de la position en fct de l'amplitude de la vitesse ($Q=500 \text{ w/m}^2$ et $V= 3 \text{ m/s}$).

Même chose pour le premier cas ($Q=1000 \text{ w/m}^2$ et $V= 3 \text{ m/s}$).

La figure 3.50 représente le Contours de Vitesse longitudinale pour la salle



Figures 3.50: Contours de Vitesse longitudinale ($Q=500 \text{ w/m}^2$ et $V= 3 \text{ m/s}$)

Même chose pour le premier cas ($Q=1000 \text{ w/m}^2$ et $V= 3 \text{ m/s}$).

La figure 3.51 représente la Vitesse transversale pour la salle.

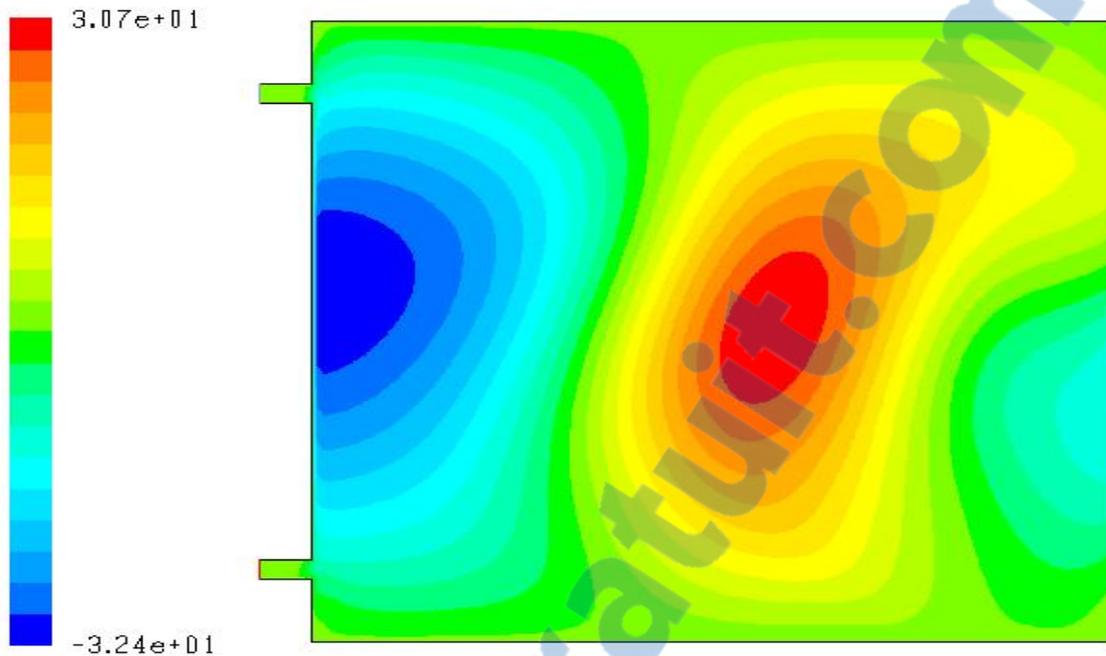


Figure 3.51 : Vitesse transversale ($Q=500 \text{ w/m}^2$ et $V=3 \text{ m/s}$)

Même chose pour le premier cas ($Q=1000 \text{ w/m}^2$ et $V=3 \text{ m/s}$).

La figure 3.52 représente le Contours des lignes de courant au niveau de la salle

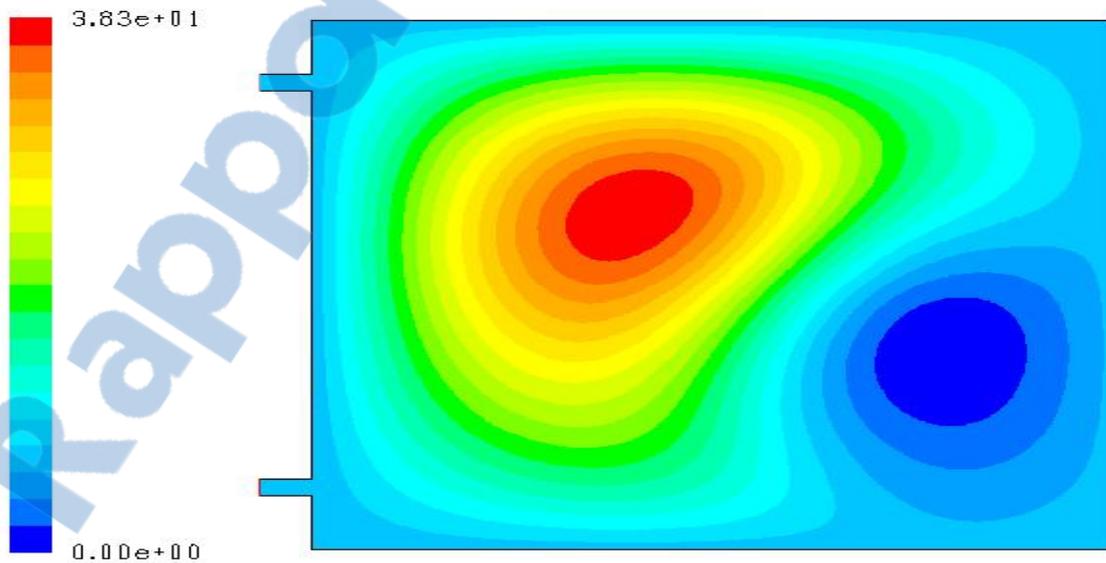


Figure 3.52 : Contours des lignes de courant ($Q=500 \text{ w/m}^2$ et $V=3 \text{ m/s}$)

Même chose pour le premier cas ($Q=1000 \text{ w/m}^2$ et $V= 3 \text{ m/s}$).

Champs de température :

La figure 3.53 représente le Contours de température au niveau de la salle

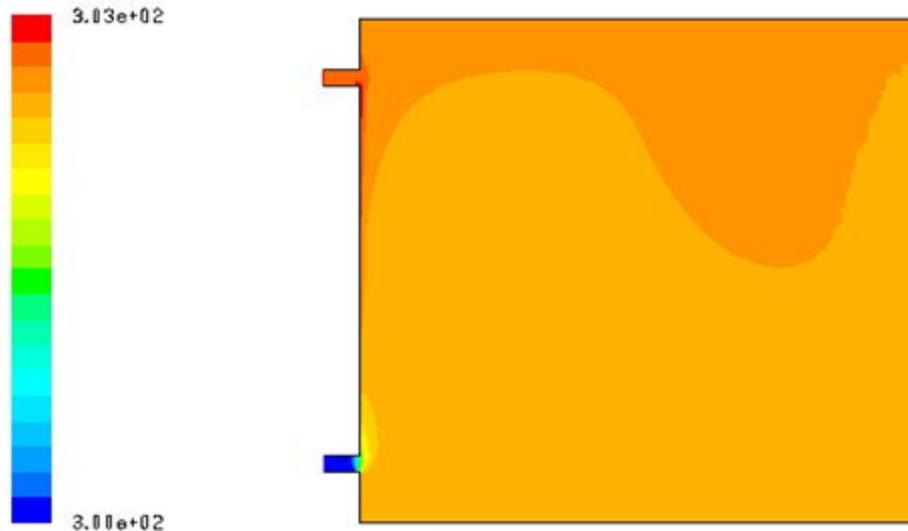


Figure 3.53 : Contours de température ($Q=500 \text{ w/m}^2$ et $V= 3 \text{ m/s}$)

On remarque que une faible diminution de la température par rapport au 1^{er} cas ($Q=1000 \text{ w/m}^2$ et $V= 3 \text{ m/s}$)

Champs de turbulence :

La figure 3.54 représente le Contours de l'énergie cinétique turbulente, les lignes de K la salle

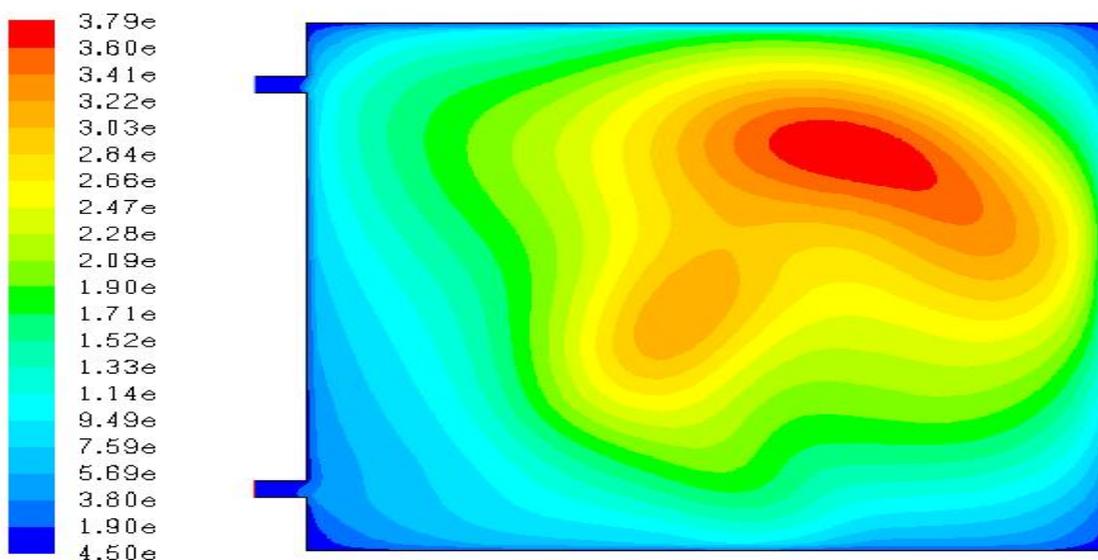


Figure 3.54 : Energie cinétique turbulente ($Q=500 \text{ w/m}^2$ et $V= 3 \text{ m/s}$)

Aucun changement avec le premier cas ($Q=1000 \text{ w/m}^2$ et $V= 3 \text{ m/s}$).

La figure 3.55 Représente le Taux de dissipation epsilon pour la salle.

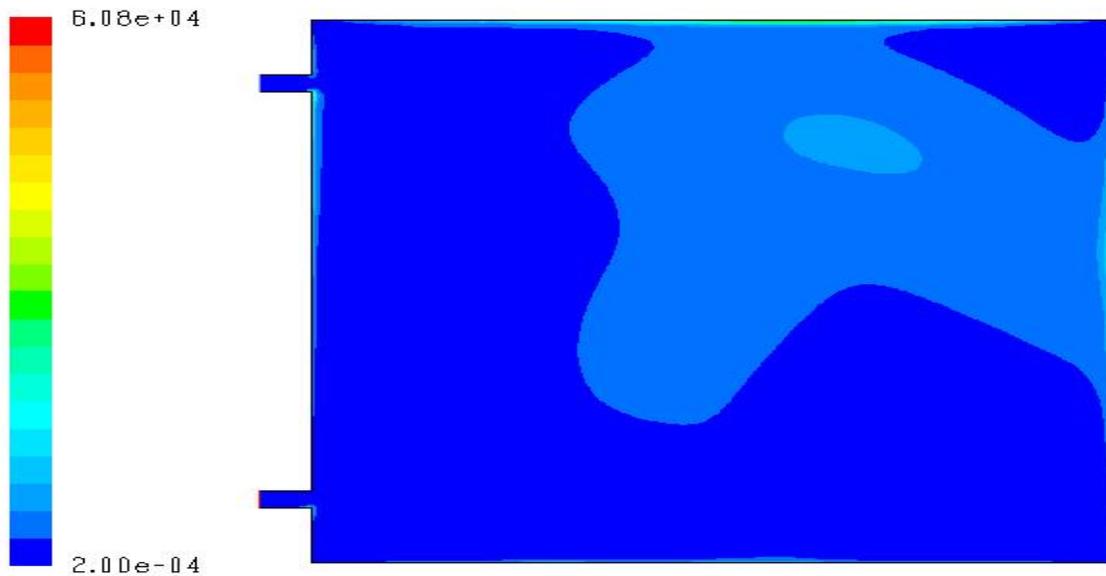


Figure 3.55 : Taux de dissipation epsilon pour la salle. ($Q=500 \text{ w/m}^2$ et $V= 3 \text{ m/s}$)

Aucun changement avec le premier cas ($Q=1000 \text{ w/m}^2$ et $V= 3 \text{ m/s}$).

4^{ème} Cas : $Q= 500 \text{ w/m}^2$ et $V= 1.5 \text{ m/s}$

Champ de Vitesse :

La figure 3. 56 Représente le Contours d’amplitude de la vitesse pour la salle.

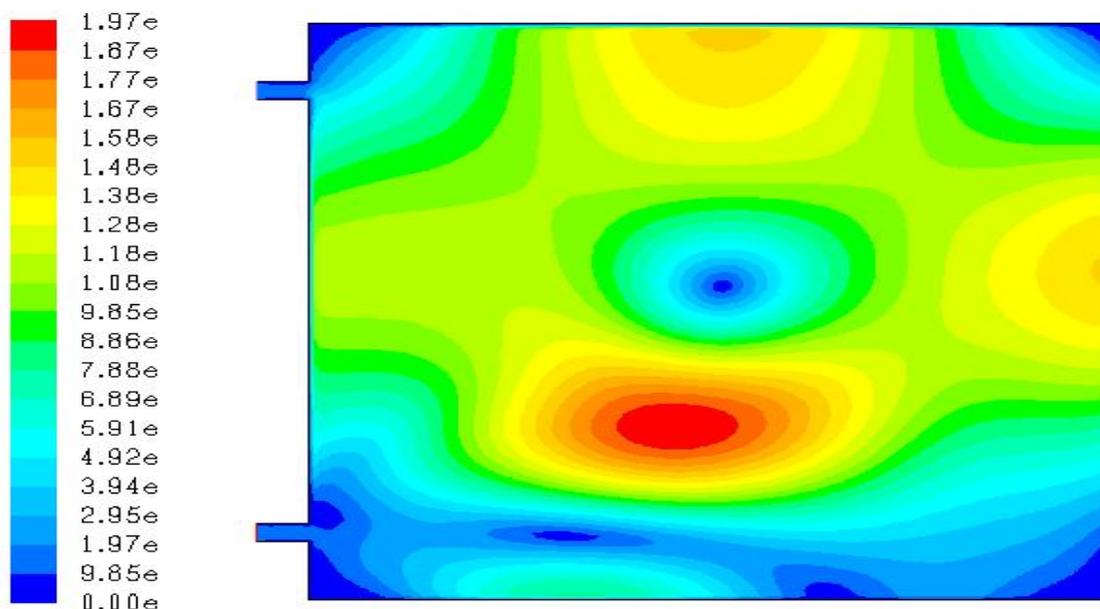


Figure 3.56 : Le Contours d’amplitude de la vitesse pour la salle ($Q=500 \text{ w/m}^2$ et $V= 1,5 \text{ m/s}$).

La vitesse reste constante comme pour le 2^{ème} cas ($Q=1000 \text{ w/m}^2$ et $V= 1,5 \text{ m/s}$)

La Figure 3.57 Représente le graphe de la position en fonction de l'amplitude de la vitesse

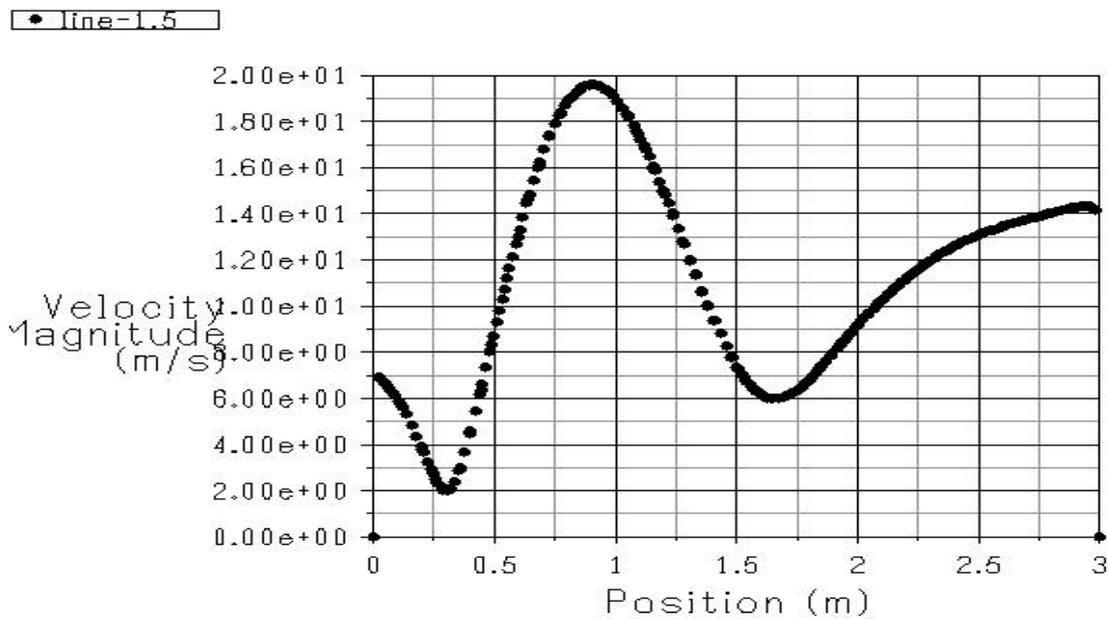
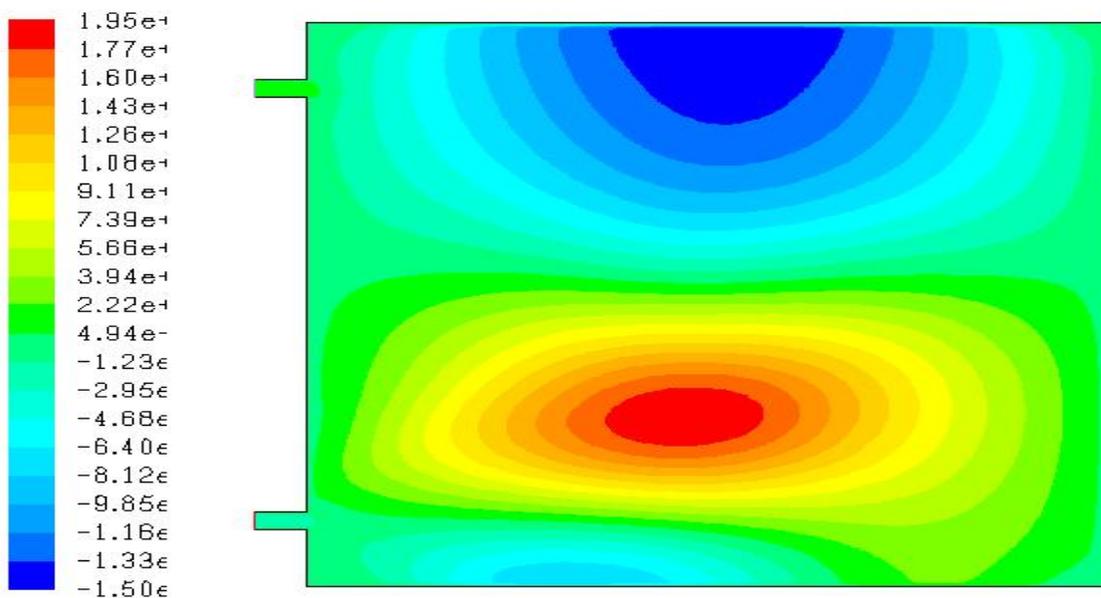


Figure 3.57 : Graphe de la position en fct de l'amplitude de la vitesse ($Q=500 \text{ w/m}^2$ et $V= 1,5 \text{ m/s}$).

La vitesse reste constante comme pour le 2^{ème} cas ($Q=1000 \text{ w/m}^2$ et $V= 1,5 \text{ m/s}$)

La figure 3.58 représente le Contours de Vitesse longitudinale pour la salle



Figures 3. 58: Contours de Vitesse longitudinale ($Q=500 \text{ w/m}^2$ et $V= 1.5 \text{ m/s}$)

La vitesse reste constante comme pour le 2^{ème} cas ($Q=1000 \text{ w/m}^2$ et $V= 1,5 \text{ m/s}$)

La figure 3.59 représente la Vitesse transversale pour la salle.

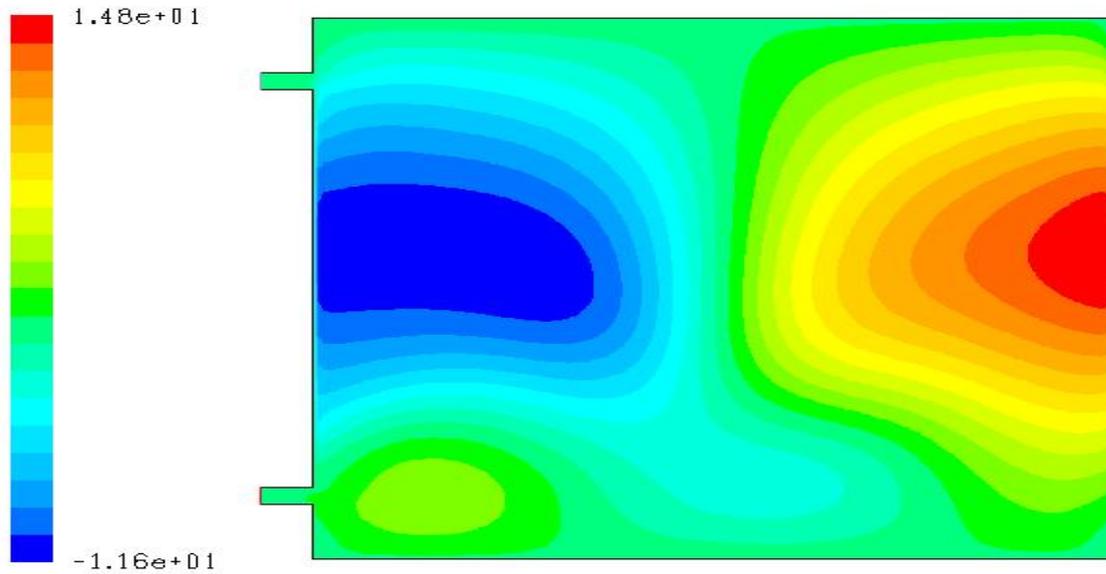
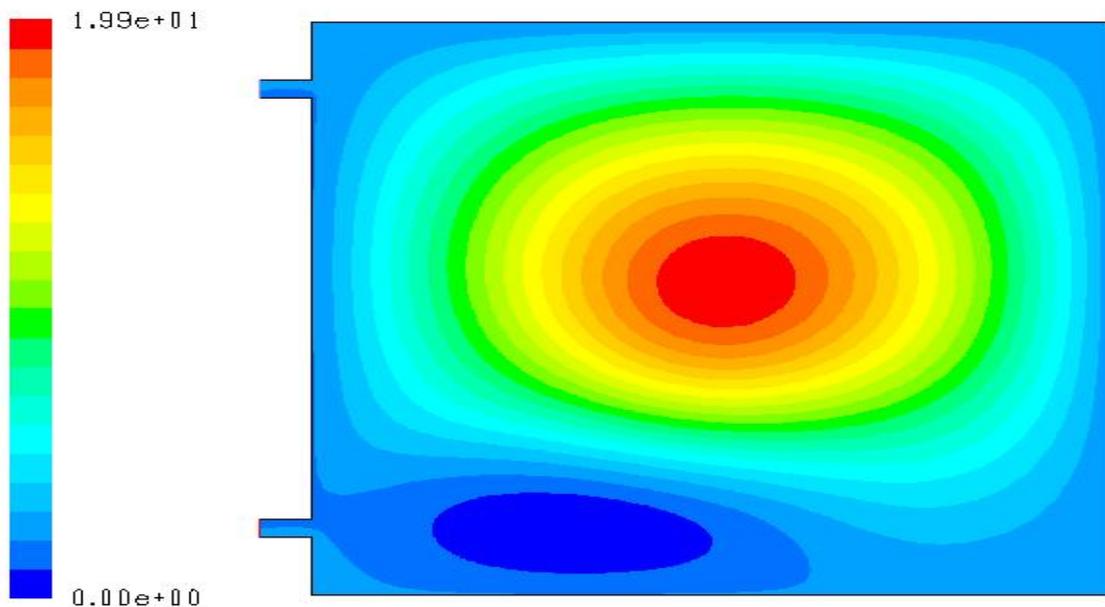


Figure 3.59 : Vitesse transversale ($Q=500 \text{ w/m}^2$ et $V= 1.5 \text{ m/s}$)

La vitesse reste constante comme pour le 2^{ème} cas ($Q=1000 \text{ w/m}^2$ et $V= 1,5 \text{ m/s}$)

La figure 3.60 représente le Contours des lignes de courant au niveau de la salle



La figure 3.60 : Contours des lignes de courant ($Q=500 \text{ w/m}^2$ et $V= 1.5 \text{ m/s}$)

Aucun changement avec le 2^{ème} cas ($Q=1000 \text{ w/m}^2$ et $V= 1.5 \text{ m/s}$).

Champs de température :

La figure 3.61 représente le Contours de température au niveau de la salle

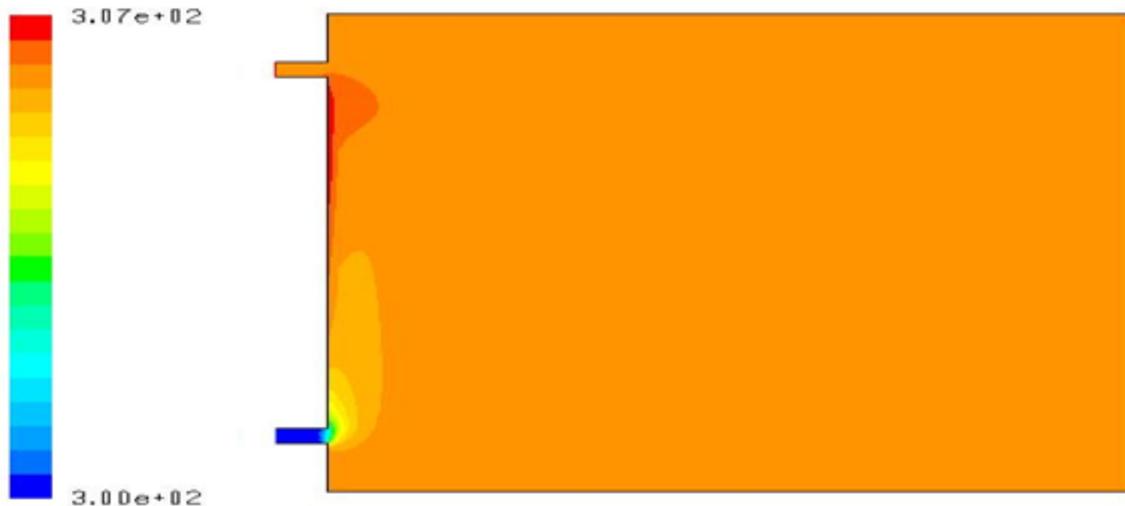


Figure 3.61 : Contours de température ($Q=500 \text{ w/m}^2$ et $V= 1.5 \text{ m/s}$)

On remarque que une faible diminution de la température par rapport au 2^{ème} cas ($Q= (1000 \text{ w/m}^2$ et $V= 1.5 \text{ m/s}$)

Champs de turbulence :

La figure 3.62 représente le Contours de l'énergie cinétique turbulente, les lignes de K la salle

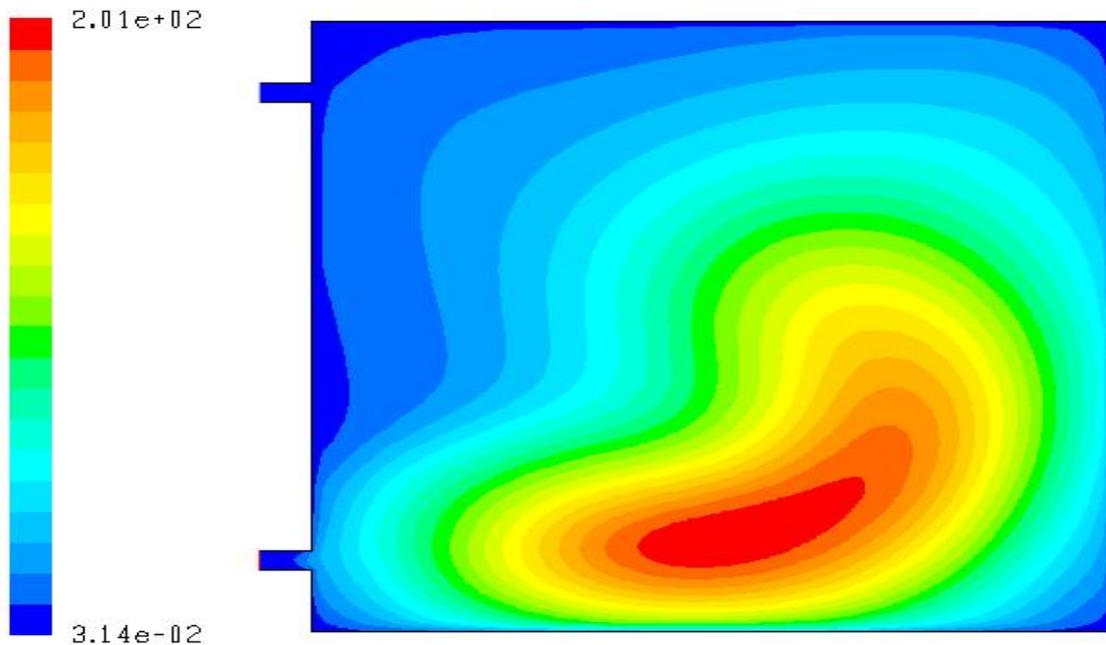
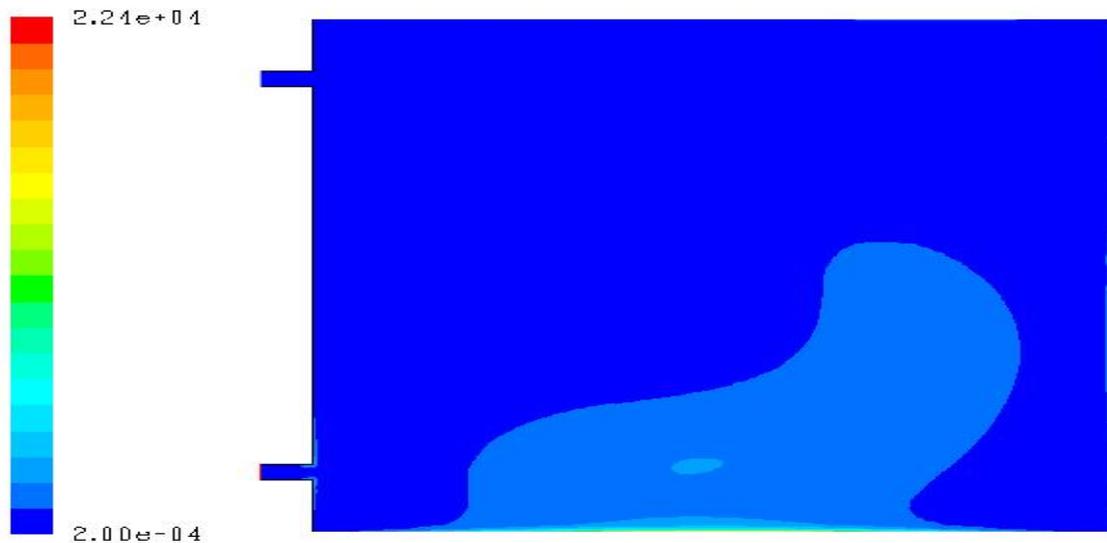


Figure 3.62 : Energie cinétique turbulente ($Q= 500 \text{ w/m}^2$ et $V= 1.5 \text{ m/s}$)

Aucun changement avec le 2^{ème} cas ($Q=1000 \text{ w/m}^2$ et $V= 1.5 \text{ m/s}$).

La figure 3.63 Représente le Taux de dissipation epsilon pour la salle.



La figure 3.63 : Représente le Taux de dissipation epsilon pour la salle. ($Q=500 \text{ w/m}^2$ et $V= 1.5 \text{ m/s}$)
Aucun changement avec le 2^{ème} cas ($Q=1000 \text{ w/m}^2$ et $V= 1.5 \text{ m/s}$).

3.4.2.2 Dépouillement et comparaison des Résultats

Dans le cas où la vitesse d'entrée reste constante l'augmentation du flux n'influe pas sur les champs de vitesse et de turbulences, mais influe positivement seulement sur les champs de températures.

Dans le cas où le flux reste constant et on augmente la vitesse d'entrée les valeurs des deux champs vitesse et turbulence augmentent aussi, et les valeurs de champs de température diminuent.

Conclusion

Dans ce chapitre on a présenté la cavité à étudier qui adapte un système de chauffage par mur trombe.

Pour étudier ce système on a fait une simulation pour voir son efficacité sur les besoins et les normes de la salle.

Après une analyse de simulation on a pu voir le fonctionnement du mur trombe et déterminé son efficacité pour le chauffage pendant la saison hivernal.

Donc on peut dire que le mur trombe est un système efficace et répond aux besoins en chauffage pour la cavité.

Conclusion Générale

Conclusion générale

Le but de ce travail portait sur l'étude et la simulation d'une cavité couplée à un mur trombe.

Tout au long de ce travail on a procédé à l'étude des performances thermiques l'amplitude de la vitesse, le champ de température et le champ de turbulence.

La simulation a été faite pour deux types de conditions : Les conditions flux constante et vitesse d'entrée variable ensuite flux variable et vitesse d'entrée constante.

On obtient, comme résultat, la variation du champ de température, champ de vitesse et champ de turbulence pour les deux types de conditions posées.

Notre étude et simulation nous a permis de voir que le flux et la vitesse d'entrée ont une influence importante pour répondre aux besoins en chauffage d'une salle.

En conclusion, il est certain que si l'on parvient à mettre au point des systèmes de chauffage par mur trombe qui est efficace, performant et économiques on contribue énormément à faire baisser la consommation en énergie fossile et par conséquent, la baisse de la facture des coûts a payé.

BIBLIOGRAPHIE

[1] [http:// www.ines-solaire.org](http://www.ines-solaire.org)

[2] Ch. Perrin, Ch. Vauge, «Le gisement solaire ». Technique et documentation (Lavoisier), 1982.

[3] Energie Renouvelable, wikipedia, 2015.

[4] http://fr.wikipedia.org/wiki/%C3%89nergie_renouvelable#.C3.89nergie_solaire_thermique

[5] <http://www.connaissancedesenergies.org/fiche-pedagogique/solaire-thermique>

[6] <http://www.fao.org/wairdocs/x5164f/X5164f0b.htm#3.4.3>. la pratique du séchage solaire

[7] <http://portail.cder.dz/spip.php?article1897>

[8] Génie énergétique énergie Solaire Calculs et optimisation, page 125-127, Jaques BERNARD, Technosup, ellipses, 2004, France

[9] Akbari, H., & Borgers, T. R. (1979). Free convective laminar flow within the Trombe wall channel. Solar Energy, 22(2), 165–174.

[10] <http://www.connaissancedesenergies.org/fiche-pedagogique/solaire-thermique#notes>

- [11] Courgey, S., & Oliva, J.-P. (2006,2007). La Conception Bioclimatique . Mens, France: Terre Vivante.
- [12] <https://mur.ooreka.fr/comprendre/mur-trombe>
- [13] http://www.nrel.gov/documents/pdfs/trombe_wall.pdf (juin 2014)
- [14] Conception bioclimatique des bâtiments K. Tsipras Page 214)
- [15] Bioclimatic design of buildings K. Tsipiras page 213
- [16] D.M. Utzinger, 'Analysis of Building Components Related to Direct Solar Heating of Building', M.S. Thesis, University of Winconsin, Madison, 1979.
- [17] A. Zerrouki, 'Expérimentation d'un Capteur Solaire à Air avec Absorbeur en Forme de Persiennes pour une Utilisation en Architecture'. Thèse de Magister, Centre d'Etudes Nucléaires et Solaires, 1986
- [18] A.Akbarzadeh, W.W.S. Charters and D.A. Lessbi, 'Thermocirculation Characteristics of a Trombe Wall Passive Test Cell', Solar Energy, Vol. 28, N°6, 1982.
- [19] Rev. Energ. Ren. : Valorisation (1999) 195-198 Evaluation des Performances d'un Mur Trombe
- [20] Etude des Performances Thermiques d'un Mur Trombe M.K. Cherier , T. Benouaz
S.M.A. Bekkouche , et M. Hamdani ,
- [21] Alamdari F. Hammond G., (1963) Improved data correlations for buoyancy-driven convection in rooms, Build. Serv. Rex Technol., 4 106-1 12

[22] Duffin, R.J., Knowles, G., 1985. A Simple Design Method for the trombe wall Sol. Energy 34(1), 69-72.

[23] <http://www.andi.dz/PDF/monographies/Tlemcen.pdf>

[24] <http://www.carte-algerie.com/plan-1565-wilaya-de-tlemcen.html>

[25] https://www.meteoblue.com/fr/meteo/prevision/modelclimate/tlemcen_alg%C3%A9rie_2475687

[26] Amara. S, (2009), «Optimisation des apports d'énergies hybrides dans l'habitat économe. Application au site de Tlemcen», Thèse de Magister, Université Abou Bakr Belkaid–Tlemcen.

[27] <http://www.habitatpresto.com/construction-renovation/maconnerie/38-elevation-mur#plan11>

[28] <http://bricobistro.com/divers-types-de-murs>

[29] IBGE -INSTITUT BRUXELLOIS POUR LA GESTION DE L'ENVIRONNEMENT - Guide pratique pour la construction et la rénovation durable de petits bâtiments – JUILLET 2010

[30] Revue des Energies Renouvelables Vol. 13 N°4 (2010) page : 548 M.A. Boukli Hacène* , N.E. Chabane Sari, B. Benyoucef et S. Amara

[31] <http://www.futura-sciences.com/maison/dossiers/batiment-inertie-thermique-cle-maison-870/page/5>

