

RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE



MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR
ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE



ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

Mémoire de fin d'études

En vue de l'obtention de diplômes d'ingénieur d'état
en Génie Mécanique

THEME

CHAUFFAGE SOLAIRE D'UNE MAISON
PAR DALLE CHAUFFANTE

Proposé par :

Réalisé par :

Promoteur :



CDER

Mr. AMARA Amokrane
Mr. AMANI Madjid

Mr. M. MADANI
Mme. F. SAHNOUNE

Promotion Juin
2012

Ecole Nationale Polytechnique 10, Avenue Hassen Badi BP 182 EL-Harrach 16200 Alger ; Algerie

Tel : +213 52 53 01/03 – Fax : +213 21 52 29 73 << www.enp.edu.dz >>



Remerciements

Nous remercions DIEU tout puissant qui nous a donné le courage, la force et la volonté pour réaliser ce modeste travail.

Nos sincères remerciements à notre promoteur Monsieur MADANI Mohamed pour ses précieux conseils et orientations.

Un très grand merci à notre Co-promotrice Madame SAHNOUNE Fatiha pour sa collaboration, son soutien et ses conseils.

Nous remercions également le président et les membres du jury d'avoir accepté d'évaluer notre travail ainsi que le corps des enseignants du département génie mécanique.

Nous tenons également à remercier tous nos amis et nos camarades de la promotion, et tous ceux qui ont contribués de près ou de loin à la bonne réalisation de ce travail.



Amokrane et Madjid

Dédicaces

Je dédie ce travail à :

La mémoire de mon père ; à ma très chère mère ; ma grand-mère ; Ma famille (mes frères et Sœurs, mes oncles et tantes, mes cousins et cousines) et Tous mes amis, sans exception.

AMARA Amokrane.

Je dédie ce modeste travail :

*A ma très chère mère qui m'a vraiment beaucoup aidé et soutenu à compléter mes études;
A mon très cher père ; Ma famille (mes frères et Sœurs, mes oncles et tantes, mes cousins et cousines) ; Mon amie A.HASSINA et Tous mes amis, sans exception.*

AMANI Madjid.



الملخص:

الغرض من هذا العمل هو تقديم رؤية شاملة عن تكنولوجيا لديها مستقبل واعد الا وهي تكنولوجيا التدفئة بواسطة الطاقة الشمسية بأرضية مدفئة وتطبيق هذه التكنولوجيا لتدفئة منزل بتيزي وزو. ينقسم هذا العمل إلى أربعة أقسام أساسية، القسم الأول نخص به تقديم القوانين الأساسية لدراسة الإشعاع الشمسي و شرح تقنية التدفئة بالطاقة الشمسية بواسطة أرضية مدفئة و تقديم مختلف القوانين الفيزيائية التي سنحتاج إليها، القسم الثاني يخص تقديم شروحات حول مختلف مكونات المنشأة، القسم الثالث نخص به إيجاد الضياع في الإستطاعة الحرارية، أما القسم الرابع يتعلق بإتخاذ قرارات في إختيار مختلف مكونات المنشأة ودراسة أبعادها.

كلمات مفاتيحية: أرضية مدفئة، تدفئة شمسي، ملقط شمسي

RESUME :

Le travail présenté dans ce mémoire consiste à présenter l'une des techniques de chauffage qui a un avenir très prometteur qu'on appelle le chauffage solaire par dalle chauffante et qu'on va appliquer pour le chauffage d'une maison située dans la région de TIZI OUZOU. ce travail est scindé en quatre parties principales ; la première est consacré à la présentation des lois qui régissent le rayonnement solaire et les lois physiques de base et une vue globale sur le chauffage solaire par dalle chauffante, la deuxième va nous renseigner sur les principaux éléments de l'installation , la troisième va nous donner les déperditions thermique de la maison quant à la dernière partie ;elle va nous renseigner sur les choix des éléments de l'installation et leurs dimensionnements.

Mots clé : Dalle chauffante, chauffage solaire, capteurs solaires.

ABSTRACT:

The purpose of this work is to present one of the heating technology which has a great future, we call this « the solar heating by slab heating ». This technology will be applied for the heating of a house in Tizi Ouzou region. This work is divided into four main parts ; the first one is devoted to the presentation of the governing laws of the solar radiation and the basic physical laws with an overview on the solar heating by « slab heating ». The second topic is consecrated to the presentation of the main elements of the installation. The study of the heat loss in the house, will be treated in the third chapter. The last part is devoted to the selection and the design of the plant components.

Keywords: slab heating, solar heating, solar collectors.

TABLE DES MATIERES

| | |
|--|----------|
| CHAPITRE I : LE GISEMENT SOLAIRE ET LE PLANCHER CHAUFFANT | 2 |
| I.1.INTRODUCTION | 3 |
| I.2. LE RAYONNEMENT SOLAIRE | 3 |
| I.2.1. Généralités sur le Soleil | 3 |
| I.2.2. Constante Solaire | 4 |
| I.2.3. Translation et rotation de la terre | 4 |
| I.2.4. Le spectre solaire | 5 |
| I.3. LA POSITION DU SOLEIL | 6 |
| I.3.1. Les coordonnées géographiques terrestres..... | 6 |
| I.3.2. Déclinaison δ | 7 |
| I.3.3. L'équation du temps ET..... | 8 |
| I.3.4. Le temps solaire vrai et l'angle horaire du soleil | 8 |
| I.3.5. Hauteur angulaire du soleil h | 10 |
| I.3.6. Azimut du soleil a | 10 |
| I.3.7. Définition | 11 |
| I.3.7.1. Durée d'insolation (SS)..... | 11 |
| I.3.7.2 Insolation potentielle (SS0)..... | 12 |
| I.3.7.3 Fraction d'insolation (σ) | 12 |
| I.3.8. Décalage horaires | 11 |
| I.3.9 Fuseau horaire | 12 |
| I.4. ECLAIREMENT D'UN RECEPTEUR PLAN | 13 |
| I.4.1. Rayonnement global G | 14 |
| I.4.2. Rayonnement diffus D | 14 |
| I.4.3. Instrument de mesure d'éclairement | 15 |
| I.4.3.1. Mesures effectuées par un Pyranomètre | 15 |
| I.4.3.2.Pyrhéliomètre et rayonnement Direct | 16 |
| I.4.4.L'effet de l'atmosphère sur le rayonnement solaire | 17 |
| I.5. Estimation de l'éclairement solaire..... | 17 |
| I.5.1. Définition | 17 |
| I.5.2. La variation de l'éclairement solaire direct normal selon les conditions climatiques | 17 |

| | |
|---|-----------|
| I.6. LE PLANCHER SOLAIRE..... | 19 |
| I.6.1.1.Plancher chauffant basse température..... | 19 |
| I.6.1.2.Plancher solaire direct (PSD®)..... | 19 |
| I.6.1.3.Capteur solaire thermique..... | 19 |
| I.6.1.4.Liquide caloporteur..... | 20 |
| I.6.1.5.Énergie d'appoint..... | 20 |
| I.6.1.6.système solaire combiné..... | 20 |
| I.6.1.6.a .Le plancher solaire direct (PSD®)..... | 21 |
| I.6.1.6.b. Le système à hydro-accumulateur..... | 21 |
| I.6.2.Principe et schéma de fonctionnement..... | 22 |
| I.7. CONCLUSION..... | 24 |
| CHAPITRE II : NOTIONS DE TRANSFERT DE CHALEUR..... | 25 |
| II.1.INTRODUCTION..... | 26 |
| II.2.GENERALITES SUR LES TRANSFERTS DE CHALEUR..... | 26 |
| II.2.1. Introduction..... | 26 |
| II.2.2.Définitions..... | 26 |
| II.2.2.1.Champ de température..... | 26 |
| II.2.2.2.Flux de chaleur..... | 26 |
| II.2.3.Bilan d'énergie..... | 26 |
| II.2.4.Expression des flux d'énergie..... | 28 |
| II.2.4.1.Conduction..... | 28 |
| II.2.4.2.Convection..... | 31 |
| II.2.4.3.Rayonnement..... | 32 |
| II.2.5.Flux de chaleur lié à un débit massique..... | 32 |
| II.2.6.Déperditions..... | 34 |
| II.2.6.1.Les déperditions par transmission..... | 34 |
| II.2.6.2.Déperditions par infiltration..... | 34 |

| | |
|---|-----------|
| II.2.6.3.Déperditions globales (coefficient GV)..... | 35 |
| II.2.6.4.Déperditions dans un lieu donné pour la période hivernale | 35 |
| II.3.CONCLUSION | 35 |
| CHAPITRE III : DESCRIPTION DES ELEMENTS DE L'INSTALLATION..... | 36 |
| III.1.INTRODUCTION..... | 37 |
| III.2: PRINCIPE DU CHAUFFAGE SOLAIRE D'UNE MAISON PAR DALLE CHAUFFANTE | 37 |
| III.3.DIFFERENTS TYPES DE CAPTEURS SOLAIRES THERMIQUES | 38 |
| III.3.1. Capteur sans vitrage | 38 |
| III .3.2.Capteurs vitrés..... | 39 |
| III.3.2.1.Le Coffre | 40 |
| III.3.2.2.isolation thermique..... | 40 |
| III.3.2.3 Absorbeur | 41 |
| III.3.2.4.Couverture transparente | 42 |
| III.3.2.5. Le fluide caloporteur | 43 |
| III.3.3.Capteur sous vide | 44 |
| III.3.4.Les capteurs à tube sous vide à effet thermos | 45 |
| III.3.5.Les capteurs-stockeurs | 46 |
| III.3.6.Les capteurs plans vitrés | 46 |
| III.3.6.1.Bilan thermique d'un capteur plan | 47 |
| III.3.6.2.Rendement du capteur plan | 47 |
| III.3.6.3.Influence de la température d'entrée de fluide caloporteur..... | 48 |
| III.3.6.4.Courbe de rendement des capteurs plans | 49 |
| III.4.LES TYPE DE POMPES UTILISEES | 50 |
| III.4.1.Les pompes centrifuges | 50 |
| III.4.1.1.Principe de fonctionnement..... | 50 |
| III.4.1.2.Amorçage | 50 |

| | |
|---|-----------|
| III.4.1.3.Caractéristiques | 50 |
| III.4.1.4.Utilisation | 51 |
| III.5.LE CHAUFFAGE D'APPOINT | 52 |
| III.5.1.Les différents dispositifs de chauffage d'appoint | 52 |
| III.5.1.1. La pompe à chaleur (PAC)..... | 52 |
| III.5.1.2. Chauffage au Gaz | 54 |
| III.6.LES CONDUITES | 55 |
| III.6.1. Perte de charge dans les conduits | 55 |
| III.6.1.a. Les Pertes de Charge Linéaires ou Réparties | 55 |
| III.6.1.b. Les Pertes de Charge Locales ou Singulière | 57 |
| III.7.PLANCHER CHAUFFANT | 59 |
| II.7.1.Système de chauffage par le sol à eau chaude | 59 |
| III.8.BALLON DE STOCKAGE | 62 |
| III.8.1.Principe de fonctionnement..... | 63 |
| III.8.2.Performance du ballon de stockage..... | 63 |
| III.8.3.Les différentes formes qu'on pourra utiliser dans la fabrication des ballons de stockage de chaleur | 64 |
| III.9.REGULATEUR DE CHAUFFAGE..... | 64 |
| III.10.CONCLUSION | 65 |
| CHAPITRE IV : CALCUL DES DEPERDITIONS THERMIQUES | 66 |
| IV.1.INTRODUCTION | 67 |
| IV.2.PRESENTATION | 68 |
| IV.2.1.Description de la maison..... | 68 |
| IV.2.2. Paramètres climatiques et thermodynamique..... | 68 |
| IV.2.3.Paramètres thermiques | 69 |
| IV.3.CALCUL DES RESISTANCES THERMIQUES DES CONSTITUANTS DE LA MAISON | 70 |
| IV.3.1.Resistance thermique de Mur ₁ R_{Mur1} | 70 |

| | |
|--|----|
| IV.3.2.Resistance thermique de Mur ₂ $R_{\text{mur}2}$ | 72 |
| IV.3.3.Resistance thermique de mur ₃ $R_{\text{mur}3}$ | 72 |
| IV.3.4.Resistance thermique de Mur ₄ $R_{\text{Mur}4}$ | 72 |
| IV.3.5.Resistance thermique de Mur ₅ $R_{\text{Mur}5}$ | 72 |
| IV.3.6.Resistance thermique de Mur ₆ $R_{\text{Mur}6}$ | 72 |
| IV.3.7.Resistance thermique du plafond R_{plafond} | 72 |
| IV.4.CALCUL DES DEPERDITIONS | 72 |
| IV.4.1.Déperdition par transmission | 72 |
| IV.4.2.Déperditions par infiltration..... | 73 |
| IV.5.CALCUL DES BESOINS EN CHAUFFAGE | 74 |
| IV .6.CONCLUSION | 75 |
| CHAPITRE V : DIMENSIONNEMENT DE L'INSTALLATION ET ETUDE ECONOMIQUE | 76 |
| V.1.INTRODUCTION..... | 77 |
| V.2.LES MATERIAUX UTILISES ET LEURS CARACTERISTIQUES THERMO-PHYSIQUES | 77 |
| V.3.DIMENSIONNEMENT DE LA DALLE CHAUFFANTE..... | 79 |
| V.3.1.Régime permanent..... | 79 |
| V.3.2.Détermination de la température finale de la dalle..... | 79 |
| V.3.3.L'expression de la puissance cédée par la spirale vers la dalle chauffante..... | 80 |
| V.3.4.L'expression du flux de chaleur transmis à la dalle chauffante par la tuyauterie | 80 |
| V.3.5.Calcul du temps du régime transitoire pour la dalle..... | 81 |
| V.4.CALCUL DES APPORTS SOLAIRES | 84 |
| V.4.1.Fraction d'insolation..... | 84 |
| V.4.1.calcul des différents rayonnements (G, D, I) sur une surface horizontale..... | 84 |
| V.4.2.calcul des différents rayonnements (G, D, I) sur une surface inclinée | 85 |
| V.5.DIMENSIONNEMENT DE L'INSTALLATION POUR LE CHAUFFAGE DOMESTIQUE..... | 86 |

| | |
|---|-----|
| V.5.1.Choix du capteur | 86 |
| V.5.2.Caractéristiques générales des capteurs solaires plans MEGASUN | 87 |
| V.5.3.Dimensions des capteurs | 87 |
| V.5.4.Rendement du capteur | 87 |
| V.5.5.Surface de captation | 88 |
| V.6.DETERMINATION DES CARACTERISTIQUE DE LA POMPE | 88 |
| V .6.1.Calcul des pertes de charge linéaires dans la spirale | 89 |
| V .6.2.Calcul du nombre de Reynolds | 89 |
| V .6.3.Calcul des pertes charges singulière..... | 90 |
| V.7.BALLON DE STOCKAGE | 91 |
| V.7.1.Le surplus d'énergie quand on a des déperditions inférieur aux déperditions maximales | 92 |
| V.7.2.Débit massique d'eau chauffée par le surplus d'énergie | 92 |
| V .8.CHOIX DE LA POMPE A CHALEUR..... | 94 |
| V.9.CHOIX DU CHAUFFAGE AU GAZ..... | 95 |
| V.9.DIMENSIONNEMENT DE LA POMPE A CHALEUR ET DE LA CHAUDIERE A GAZ..... | 95 |
| V.10 .Régulation du chauffage..... | 96 |
| V.11.ETUDE ECONOMIQUE | 99 |
| V.11.1.Le KWh solaire | 99 |
| V.11.2.Les énergies traditionnelles | 99 |
| V.11.2.1.Gaz naturel | 99 |
| V.11.2.2.Electricité..... | 100 |
| V.11.2.3.Gaz butane | 100 |
| V.11.2.4 .Fioul (mazoute) | 100 |
| V.12.CONCLUSION | 101 |

LISTE DES FIGURES

| | |
|---|----|
| Fig. I.1 Schématisation du mouvement de la terre autour du Soleil | 5 |
| Fig. I.2 : Spectre du soleil à la limite de l'atmosphère terrestre | 6 |
| Fig. I.3 : Définition des coordonnées terrestres d'un lieu donné | 7 |
| Fig. I.4 Variation annuelle de la déclinaison solaire | 8 |
| Fig. I.5 : Variations annuelles de l'équation du temps | 8 |
| Fig. I.6 : L'angle horaire et la déclinaison | 9 |
| Fig. I.7 : Variation journalière de l'angle horaire | 9 |
| Fig. I.8 : Angles solaires | 10 |
| Fig. I.9 : Représentation de la déclinaison et de l'azimut | 11 |
| Fig. I.10 : Décalage horaire par rapport au méridien de Greenwich | 13 |
| Fig. I.11 : Inclinaison et orientation d'une surface réceptrice | 13 |
| Fig. I.12 : Mesure du rayonnement Global G | 15 |
| Fig. I.13 : Une incidence normale de Pyrhéliomètre utilisé pour mesurer la composante du rayonnement solaire direct | 16 |
| Fig. I.14 : Valeurs du rayonnement direct I_{DN} en fonction de la hauteur du soleil pour conditions moyennes et extrêmes de trouble | 18 |
| Fig. I.15 : Le plancher solaire direct (PSD®) | 19 |
| Fig. I.16 : Capteur solaire thermique | 19 |
| Fig. I.17 : Principe du plancher solaire direct (PSD®) | 22 |
| Fig. I.18 : Principe des autres systèmes combinés | 23 |
| Fig. II.1 : système et bilan énergétique | 27 |
| Fig. II.2 : Schéma du transfert de chaleur conductif | 28 |
| Fig. II.3 : Schéma électrique équivalent d'un mur simple | 29 |
| Fig. II.4 : couches de mur disposées en série | 29 |
| Fig. II.5 : schéma électrique équivalent | 30 |
| Fig. II.6 : couches de mur disposées en parallèle | 30 |

| | |
|--|----|
| Fig. II.7 : schéma électrique équivalent | 30 |
| Fig. II.8 : Schéma du transfert de chaleur convectif | 31 |
| Fig. II.9 : Schéma du transfert de chaleur radiatif | 32 |
| Fig. II.10 : Coupe d'un tube à l'intérieur circule un fluide | 32 |
| Fig. III.1 : schéma de principe | 37 |
| Fig. III.2 : Capteur sans vitrage | 38 |
| Fig. III.3 : Installation de production d'eau chaude sanitaire | 39 |
| Fig. III.4 : Coupe d'un capteur vitré | 40 |
| Fig. III.5 : Absorbeurs sous forme d'échelle et de serpentín | 41 |
| Fig. III.6 : Facteurs énergétiques d'un vitrage | 43 |
| Fig. III.7 : Capteur sous vide | 44 |
| Fig. III.8 : Coupe d'un capteur sous vide | 45 |
| Fig. III.9 : Schéma d'un capteur à tube sous vide à effet thermos | 45 |
| Fig. III.10 : capteurs stockeurs | 46 |
| Fig. III.11: schéma donnant les températures des différents éléments intervenant dans la détermination du rendement d'un capteur plan | 48 |
| Fig. III.12 : courbe de rendement des capteurs plans | 49 |
| Fig. III.13 : Schéma de principe de la pompe à chaleur à compression de vapeur | 53 |
| Fig. III.14 : Cycle frigorifique idéal | 53 |
| Fig. III.15 : Schématisation du transfert de chaleur | 54 |
| Fig. III.16 : chaudière à ventouse | 55 |
| Fig. III.17 : schéma du Rugosité dans la conduite | 56 |
| Fig. III.18 : Diagramme de Moody | 57 |
| Fig. III.19 : Elargissement brusque de la section | 58 |
| Fig. III.20 : Rétrécissement brusque de la section | 58 |
| Fig. III.21 : Plancher de type A | 61 |
| Fig. III.22 : plancher de type B | 61 |

| | |
|--|----|
| Fig. III.23 : plancher de type C | 62 |
| Fig. III.24 : Schéma de principe d'un ballon de stockage de chaleur | 63 |
| Fig. III.25 : Différents systèmes de régulation | 65 |
| Fig. IV.1 : Dimensions de la Maison F3 située à la région de Tizi-Ouzou | 67 |
| Fig. IV.2 : coupe de dessus de la Maison F3 | 67 |
| Fig. IV.3 : Plan de R.D.C de la maison F3 | 68 |
| Fig. IV.4 : Schéma équivalent de la maison F3 | 70 |
| Fig. V.1 : représentation du bilan de flux de chaleur de la dalle | 81 |
| Fig. V.2 : Histogramme des rayonnements (G, D et I) reçus par une surface horizontale..... | 85 |
| Fig. V.3: Histogramme des rayonnements (G, D, I) reçus par une surface inclinée de 30° | 86 |
| Fig. V.4 : Vue principale d'un capteur solaire plan ST2000..... | 86 |
| Fig. V.5 : tuyau en caoutchouc sous la dalle chauffante de forme spirale | 89 |
| Fig. V.6 : Ballon de stockage MEGASUN | 93 |
| Fig. V.7 : Ballon MEGASUN type VS BL-1, avec un échangeur | 93 |
| Fig. V.8 : Pompe à chaleur ATLANTIC ALFEA EVOLUTION | 95 |
| Fig. V.9 : chaudière micro-accumulation | 96 |
| Fig. V.10 : Schéma de principe de la régulation | 97 |

LISTE DES TABLEAUX

| | |
|--|----|
| Tableau. I.1 : Caractéristique du soleil..... | 3 |
| Tableau. I.2 : Durée des saisons..... | 4 |
| Tableau. I. 3 : Expressions empiriques des éclairements solaires par, ciel clair mais pour trois Conditions de troubles en fonction la hauteur solaire | 18 |
| Tableau. III.1 : Les coefficients de conductivité et la déperdition | 41 |
| Tableau. III.2 : Caractéristiques thermo-physiques de matériaux métalliques | 42 |
| Tableau. III.3 : caractéristiques énergétique des verres (épaisseur 4mm) | 43 |
| Tableau. III.4 : Coefficient de perte de charge singulière due au rétrécissement | 59 |
| Tableau. III.5 : coefficient de perte pour le cas d'un coude | 59 |
| Tableau. IV.1 : Paramètres climatiques | 68 |
| Tableau. IV.2 : constitution des murs extérieurs | 69 |
| Tableau. IV.3 : Constitution des fenêtres | 69 |
| Tableau. IV.4 : Constitution de la porte | 69 |
| Tableau. IV.5 : Constitution des impostes | 69 |
| Tableau. IV.6 : Constitution du plafond | 70 |
| Tableau. IV.7 : calcul des déperditions par transmission des parois | 73 |
| Tableau. IV.8 : perméabilités des constituants de Mur ₁ | 73 |
| Tableau. IV.9 : calcul des déperditions par infiltration de la maison | 74 |
| Tableau. IV.10 : Relevé des températures moyennes mensuelle pour la saison de chauffe des années : 2001-2002-2003-2004-2005-2006-2007-2008-2009-2010 | 75 |
| Tableau. IV.11 : Les valeurs des degrés jour pour la saison de chauffe de 2000 à 2010 | 75 |
| Tableau. V.1 : constitution de la dalle chauffante | 77 |
| Tableau. V.2 : constitution des murs de séparation | 77 |
| Tableau. V.3 : constitution de la rangé intérieure des murs extérieurs | 78 |
| Tableau. V.4 : constitution du plafond | 78 |
| Tableau. V.5 : constitution de l'air de la maison | 78 |

| | |
|---|-----|
| Tableau. V.6 : Relevé des valeurs moyennes mensuelles des durées d'insolation (SS), et durées maximales mensuelles d'insolation (SS0), et fractions d'insolation (σ) pour les années (2001.....2010) | 84 |
| Tableau. V.7 : Valeurs de G, D et I pour une surface horizontale | 84 |
| Tableau. V.8 : Valeurs de G, D et I, Φ pour une surface inclinée | 85 |
| Tableau. V.9 : caractéristiques du système capteur solaire plan MEGASUN | 87 |
| Tableau. V.10 : Rendement du capteur solaire pendant la saison de chauffe | 88 |
| Tableau. V.11 : Caractéristiques du ballon de stockage de 500L MEGASUN | 93 |
| Tableau. V.12 : Dimension du ballon de stockage MEGASUN | 94 |
| Tableau V.13.a : La consommation et prix de consommation | 100 |
| Tableau V.13.b : La consommation et prix de consommation | 100 |

TABLE DES NOMENCLATURES

Lettres latines :

| <i>symboles</i> | <i>Désignations</i> | <i>Unités</i> |
|-----------------|---|---------------|
| T_e | Température ambiante de l'air extérieur | K |
| T_i | Température de l'air de la maison | K |
| T_{df} | Température finale de la dalle chauffante | K |
| T_d | Température de la dalle chauffante | K |
| $T_{m,i}$ | Température d'entrée de l'eau dans le tube sous forme de spirale enfuie sous la dalle chauffante | K |
| $T_{m,s}$ | Température de sortie de l'eau dans le tube sous forme de spirale enfuie sous la dalle chauffante | K |
| Q | Quantité de chaleur | J |
| t | Temps | s |
| q | Flux de chaleur | W |
| q_{tot} | Déperditions totales de la maison | W |
| q_{st} | Flux de chaleur stocké | W |
| q_g | Flux de chaleur généré | W |
| q_e | Flux de chaleur entrant | W |
| q_s | Flux de chaleur sortant | W |
| C_p | Chaleur spécifique massique à pression constante | $J/Kg K$ |
| V | Volume | m^3 |
| G | Coefficient des déperditions volumique | $W/m^3°C$ |

| | | |
|-------|--|-----------|
| R_e | Nombre de Reynolds | _____ |
| h_r | Perte de charge linéaire en hauteur | m |
| a | Azimut du soleil | Degré |
| a | Diffusivité thermique | $m^2/°C$ |
| C^* | Constante solaire | W/m^2 |
| D | Rayonnement diffus | W/m^2 |
| E | L'émittance énergétique | W/m^2 |
| ET | Équation du temps minute | Minute |
| G_g | Rayonnement global | W/m^2 |
| G^* | Rayonnement global du ciel clair | W/m^2 |
| GV | Coefficient de déperdition thermique | $W/°C$ |
| G | Coefficient de déperditions volumiques | $W/m^3°C$ |
| I | Rayonnement direct | W/m^2 |

| | | |
|--------------|--|---------------------------|
| Ndj | Nombre de degrés jours | $^{\circ}C$ |
| SS | Durée d'insolation | <i>Heurs</i> |
| SS_0 | Durée maximale d'insolation | <i>Heurs</i> |
| Tsv | Temps solaire vrai | <i>Minute</i> |
| TSM | Temps solaire moyen | <i>Minute</i> |
| h_i | Coefficient de convection de l'air intérieur | $W/^{\circ}c m^2$ |
| h_e | Coefficient de convection de l'air extérieur | $W/^{\circ}c m^2$ |
| R'' | Resistance thermique par unité de surface | $m^2 \text{ }^{\circ}C/W$ |
| A_1 | Surface de la dalle chauffante | m^2 |
| F_t | Flux de chaleur transmit à la dalle chauffante | W |
| F_s | Flux de chaleur stocké dans la dalle chauffante | W |
| F_p | Flux de chaleur perdu par la dalle chauffante | W |
| T_{di} | Température initiale de la dalle chauffante | K |
| t_d | Puissance utile de la pompe de circulation | s |
| Δt_a | temps de chauffage de l'air de la maison en régime transitoire | s |
| Δt_m | Temps de chauffage de la maison en régime transitoire | s |
| S_t | Surface totale de captage | m^2 |
| N | Surface de captage pour le chauffage | m^2 |
| S | Surface du capteurs plan | m^2 |
| N_c | Nombre de couds | _____ |

| | | |
|-----------------|--|----------|
| ΔP_L | Pertes de charge linéaire en pression | P_a |
| ΔP_{s1} | Perte de charge singulière liées au couds en pression | P_a |
| ΔP_{s2} | Perte de charges singulières liées au changement de sections | P_a |
| ΔP | Perte de charges globales | P_a |
| P_u | Puissance utile de la pompe de circulation | W |
| P_f | Puissance fournie à la pompe de circulation | W |
| SE | Surplus d'énergie | W |
| V_b | Volume du ballon de stockage | m^3 |
| C_{pe} | Chaleur spécifique massique de l'eau | $J/Kg K$ |
| C_{pa} | Capacité thermique de l'air de la maison | J/K |
| \dot{m}_e | Débit massique de l'eau qui circule dans le réseau | Kg/s |
| C_{pm} | Capacité thermique de la maison | J/K |

Lettres grec :

| | | |
|-----------------|--|-----------------|
| λ | Conductivité thermique du milieu | $W/(m * K)$ |
| σ | Constante de Stefan | $W/(m^2 * K^4)$ |
| ε_p | Facteur d'émission de la surface | ————— |
| ν | Viscosité cinématique | m^2/s |
| ρ | Masse volumique | Kg/m^3 |
| α_p | Coefficient d'absorption de la plaque absorbante | % |

| | | |
|-----------|---|-------|
| τ_c | Coefficient de transmission de la couverture transparente | % |
| ρ_c | Coefficient de réflexion de la plaque absorbante | % |
| φ | Latitude | Degré |
| λ | Longitude du lieu | Degré |
| Φ | Puissance absorbée par le capteur | W |
| Φ_u | Puissance emmagasinée dans le fluide caloporteur | W |
| Φ_a | Puissance perdue par convection et rayonnement | W |
| Φ_t | Puissance de démarrage | W |

Ces dernières années nous avons constaté que l'utilisation des sources d'énergies fossiles peut être très dangereuse pour notre planète et les réserves mondiales sont limitées et arrivent bientôt à sec. Alors nous avons cherché d'autres sources d'énergies alternatives qui sont propres, sans danger pour la nature et qui sont inépuisables. et nous avons trouvé plusieurs sources d'énergie qui peuvent sauver notre planète mais nous allons nous concentrer sur l'une d'entre elles qui a un potentiel énorme à savoir notre étoile la plus proche, le soleil. En effet cet astre géant renvoi à la terre un flux de chaleur sous forme de rayonnements très intense qui pourrai couvrir les besoins énergétiques des humains et plus encore, mais une question se pose , comment capter cette énergie et l'utiliser dans la vie quotidienne des mortels ?alors quelques scientifiques se sont penché sur la question et il ont étudié et imaginé de multiples systèmes destinés au captage des rayonnements solaires mais ces scientifiques sont minoritaires face aux masses populaires et aux dirigeants politiques qui voit dans les énergies fossiles une affaire qui tourne et un élément fondamental dans l'économie mondiale, alors pourquoi changer ça ?puisque toute une culture marche avec les énergies fossiles, donc ils ont marginalisé un peu les chercheurs dans les énergie renouvelables et ils ont plutôt encouragé les découvertes dans le domaine des hydrocarbures.

Il a fallu attendre le choc pétrolier dans les années 70 pour pousser les dirigeants des différents pays à revoir leur position vis-à-vis des hydrocarbures et de voir dans les énergies renouvelables des énergies du futur tout particulièrement l'énergie solaire, et à financer des recherches dans ce domaine là.

Maintenant nous avons plusieurs techniques pour capter l'énergie solaire et l'utilisée pour répondre à nos besoins en énergie dans notre vie quotidienne, et ce modeste travail consiste à exposer et faire une étude simplifiée d'une technique destinée à capter les rayonnements solaires avec des capteurs thermiques plans et chauffer une maison situé dans la région de TIZI OUZOU en utilisant une dalle chauffante pour diffuser la chaleur dans toute la maison.

Ce travail ce compose de cinq chapitres, le premier chapitre portera sur des généralité à propos du gisement solaire et le systèmes de chauffage solaire par dalle chauffante, le deuxième chapitre sera consacré au rappels théoriques de base dans le transfert thermique et des lois physiques appliquées en générale dans les dimensionnements des différents composants de l'installation, le troisième chapitre va nous donner une description générale des différents systèmes qui composent l'installation et leurs principes de fonctionnement, le quatrième chapitre consiste à faire un bilan thermique de la maison et de calculer les déperditions de chaleur maximales de la maison dans les conditions extrêmes (saison hivernale), le cinquième et dernier chapitre sera consacré au dimensionnement des différents systèmes de l'installation à savoir le volume du ballon de stockage, le temps de chauffage de la dalle chauffante et son inertie thermique, le nombre de capteurs solaires plans, la puissance du chauffage d'appoint, la puissance de la pompe de circulation, des explications sur le système de régulation et une étude économique réduite pour voir le coté économique du chauffage solaire avec des panneaux thermiques plans.

CHAPITRE I
LE GISEMENT SOLAIRE
ET LE PLANCHER
CHAUFFANT

I. INTRODUCTION

Les mesures concernant le gisement solaire prennent une importance particulière dans la mesure où elles donnent une idée quantitative de la disponibilité de l'énergie solaire en un lieu donné. Elles constituent un outil indispensable pour tout calcul d'une installation solaire. Mais l'énergie solaire, source d'énergie gratuite, inépuisable et non polluante, peut aussi couvrir une partie des besoins de chauffage des bâtiments.

Le planché chauffant constitue un excellent moyen de chauffage car il ne prend aucune place dans la maison et on n'a pas besoin d'un moyen de stockage de la chaleur et il donne des températures douces et uniformes.

I.2. LE RAYONNEMENT SOLAIRE

I.2.1. Généralités sur le Soleil : [1]

Sur le plan cosmogonique le soleil est une étoile quelconque de type spectral (G2V), dont ni les propriétés physiques ne la distinguent des milliards d'autres étoiles formant la galaxie. Sur le plan humain cette étoile a une importance primordiale puisque sans elle la vie n'existerait pas sur terre.

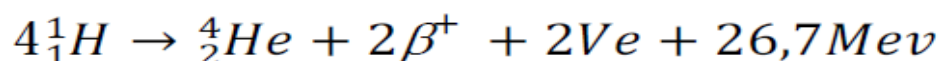
- **Caractéristiques du soleil : [1]**

Tableau I.1 : caractéristique du soleil

| Caractéristique | Valeur |
|---------------------------|---------------------------|
| Masse | $1.989 \cdot 10^{30}$ Kg |
| Diamètre | $1.392 \cdot 10^9$ m |
| Masse volumique moyenne | 1410 Kg /m ³ |
| Puissance rayonnée | $3.83 \cdot 10^{26}$ W |
| Température superficielle | 5770 K |

- **L'énergie solaire : [1]**

L'énergie solaire provient de la fusion d'hydrogène en hélium au sein du noyau de notre étoile. Deux cycles ont été imaginés par les astrophysiciens pour décrire les étapes conduisant à cette fusion (le cycle proton-proton fournit 90% de l'énergie solaire et le cycle du carbone fournit les 10% restants), on peut résumer ces deux cycles par l'équation globale suivante (en omettant le rayonnement γ) :



I.2.2. Constante Solaire : [1]

Une surface plane d'un mètre carré perpendiculaire au rayonnement solaire et située à la limite de l'atmosphère terrestre reçoit une puissance rayonnée fonction de la distance soleil terre.

Cette distance variant quelque peu au cours de l'année, compte tenu de la légère excentricité de l'orbite terrestre, il en est de même de la puissance reçue par la surface en question. On constate que le flux solaire varie peu au cours du temps. Aussi appel-t-on constante solaire, noté C^* , la valeur moyenne de la densité du flux solaire reçu à la limite de l'atmosphère terrestre ; on a :

$$C^* = 1353 \text{ W/m}^2$$

I.2.3. Translation et rotation de la terre : [2]

On peut décomposer les mouvements de la terre en considérant séparément le mouvement par rapport au centre de masse (rotation) et le mouvement de ce centre de masse par rapport à lui-même (translation).

- **Rotation de la terre**

En vingt quatre heures, la terre effectue une rotation complète d'Ouest en Est autour de son axe; c'est la base de notre système horaire. De cette rotation découle la succession des jours et des nuits.

- **Révolution de la terre**

La terre effectue un tour complet autour du soleil en 365,25 jours suivant une orbite elliptique, tandis que la vitesse moyenne de ce mouvement est d'environ 30 km/s.

La distance entre les centres de ces deux astres varie d'une valeur minimale au Périhélie ($1,47 \cdot 10^{11} \text{ m}$), aux environs du 2 janvier, à une valeur maximale, à l'Aphélie ($1,52 \cdot 10^{11} \text{ m}$), aux environs du 3 juillet, la valeur moyenne étant appelée unité astronomique (UA) :

$1 \text{ UA} = 149\,597\,870 \text{ km}$ [1].

Les mouvements de la terre autour de son axe et autour du soleil sont illustrés dans la figure (I.1), alors que le tableau (I.2) montre la durée des saisons conséquentes à ce mouvement :

Tableau. I.2 : Durée des saisons

| Saisons (Hémisphère N.) | Durée moyenne | Du | Au |
|----------------------------|--------------------|------|-------|
| Printemps..... | 92 jours 20 heures | 21/3 | 21/6 |
| Eté..... | 93 jours 15 heures | 21/6 | 23/9 |
| Automne..... | 89 jours 19 heures | 23/9 | 22/12 |

| | | | |
|------------|----------|-------|------|
| Hiver..... | 89 jours | 22/12 | 21/3 |
|------------|----------|-------|------|

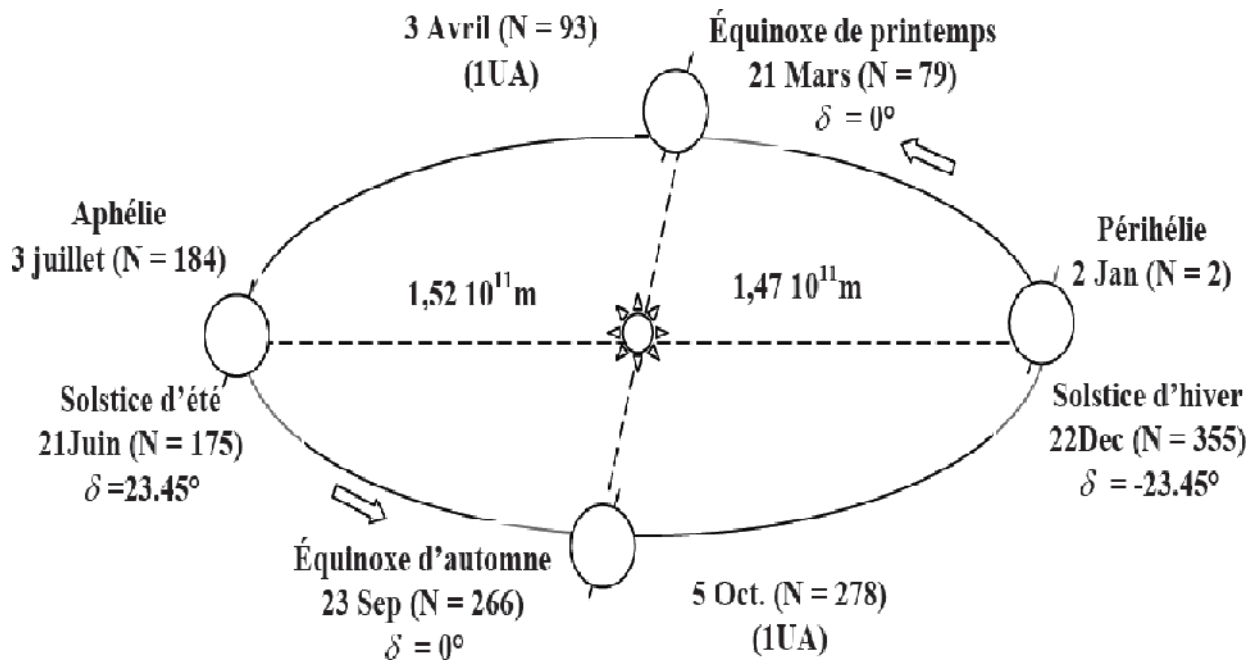


Fig. I.1: Schématisation du mouvement de la terre autour du Soleil

I.2.4. Le spectre solaire : [2]

On appelle émittance énergétique **E** (en un point d'une surface) le quotient du flux énergétique émis par un élément de surface par l'aire de cet élément :

$$\mathbf{E=d\Phi/dS} \tag{I.1}$$

L'émittance énergétique monochromatique E_λ est l'émittance énergétique de radiation comprise entre λ et $\lambda+d\lambda$ ou $d\lambda$ est un infiniment petit positif, tel que :

$$\mathbf{E= \int_0^\infty E_\lambda d\lambda} \tag{I.2}$$

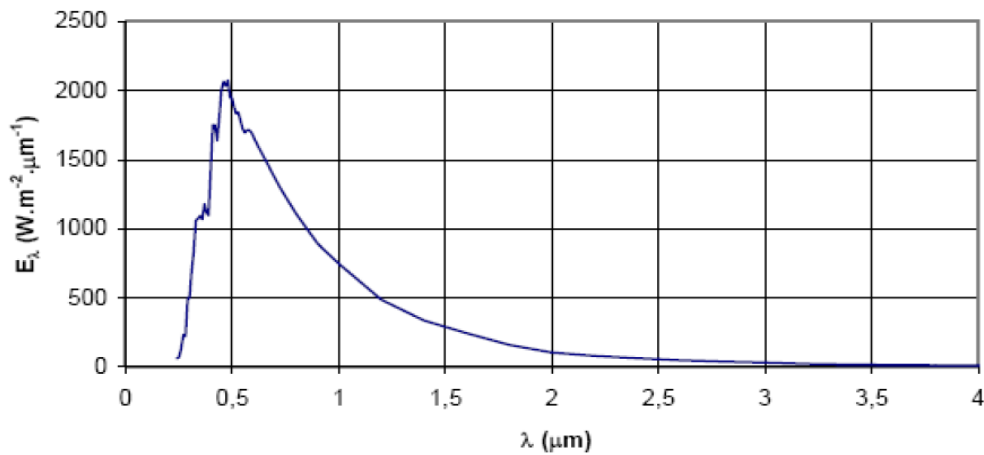


Fig. I.2: Spectre du soleil à la limite de l'atmosphère terrestre

On observe dans la figure I.2 que 98% du rayonnement solaire est émis dans des longueurs d'ondes inférieures à $4\mu\text{m}$. En première approximation, le rayonnement solaire peut être assimilé au rayonnement d'un corps noir à une température de 5770 K .

I.3. LA POSITION DU SOLEIL

Les ondes électromagnétiques provenant du soleil portent l'énergie, la projection de cette énergie dépend de l'orientation de la surface réceptrice. Pour récupérer le maximum d'énergie en provenance du soleil, il est nécessaire d'orienter au mieux le récepteur par rapport aux rayons lumineux. La connaissance de la position du soleil en fonction du temps est primordiale.

I.3.1. Les coordonnées géographiques terrestres : [3]

Ce sont les coordonnées angulaires qui permettent de repérer un point sur la terre.

- **Latitude φ**

Une des coordonnées terrestres d'un point de notre planète. C'est l'angle que fait le plan de l'équateur avec la direction reliant le centre de la terre au point considéré. Sa valeur est positive dans l'hémisphère nord, et est négative dans l'hémisphère sud.

- **Longitude λ**

Une des coordonnées terrestres d'un point de notre planète. C'est l'angle que fait le méridien local passant par le point considéré avec le méridien d'origine passant par la ville de Greenwich. Sa valeur est positive à l'ouest et est négative à l'est de la méridienne origine.

- **Méridien**

Grand cercle de la terre passant par les pôles. Tous les points d'un même méridien ont évidemment la même longitude ; le méridien pris pour origine (0°) des longitudes est celui de Greenwich. Le plan méridien en un lieu est déterminé par ce lieu et par l'axe des pôles;

sa trace au sol est parfois dénommée : méridienne. Le temps solaire vrai est identique, à un instant donné, pour tous les points d'un même méridien.

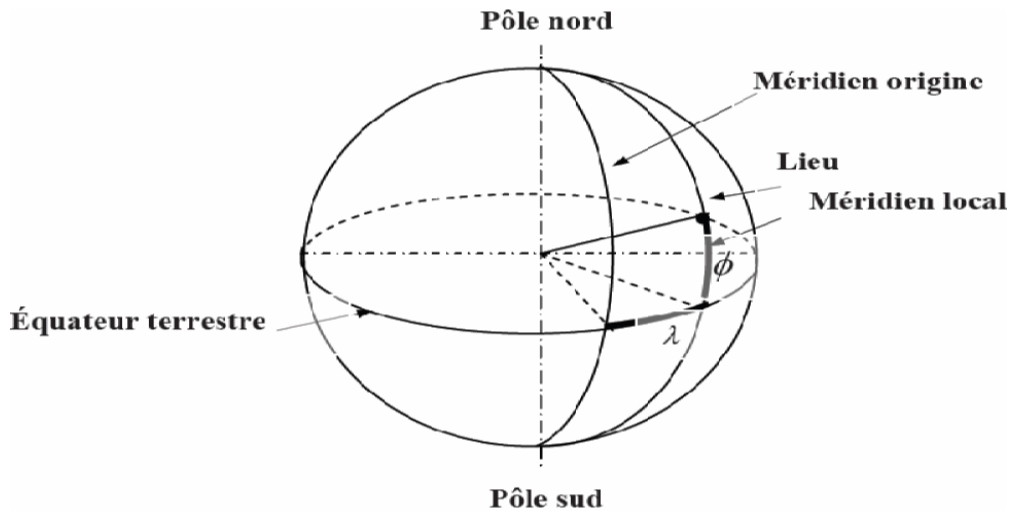


Fig. I.3 : Définition des coordonnées terrestres d'un lieu donné

I.3.2. Déclinaison δ : [2]

C'est l'angle formé par le vecteur Soleil-Terre avec le plan équatorial. Elle est due à l'inclinaison de l'axe des pôles terrestre par rapport au plan écliptique, ce qui est traduit par les différentes saisons. Elle varie au cours de l'année entre -23.45° et $+23.45^\circ$. Elle est nulle aux équinoxes de printemps (21 mars) et d'automne (23 septembre), et maximale aux solstices d'été (22 juin) et d'hiver (22 décembre).

La variation journalière de la déclinaison est d'environ de 0.5° . Elle est calculée par une équation simple approximative :

$$\delta = 23.45 \cdot \sin \left[\frac{360}{365} (284 + n) \right] \quad (\text{I.3})$$

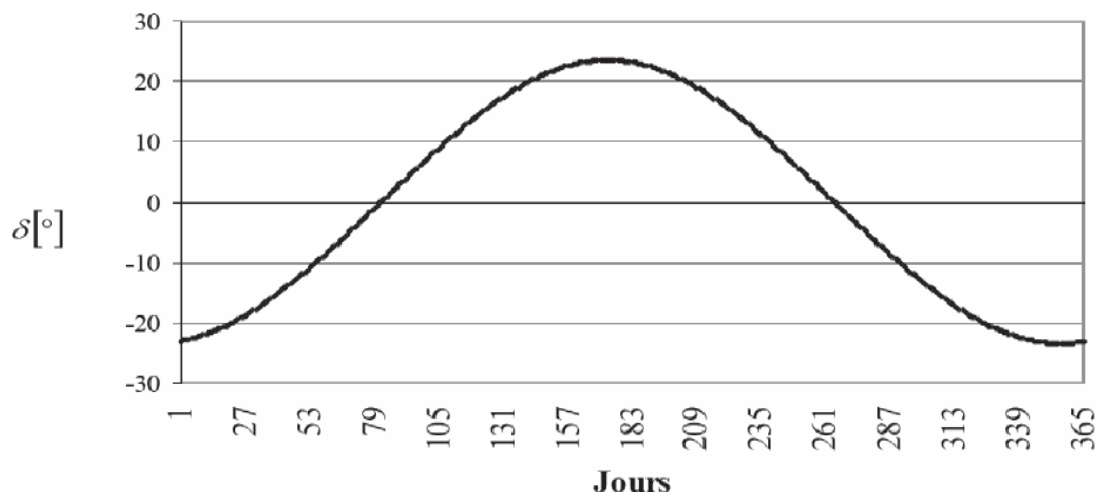


Fig. I.4 : Variation annuelle de la déclinaison solaire

I.3.3. L'équation du temps ET : [2]

C'est l'écart entre le temps solaire moyen **TSM** et le temps solaire vrai **TSV** selon le jour de l'année considéré :

$$ET = TSV - TSM \quad (I.4)$$

La figure **I.5** montre la variation de **ET** durant l'année donnée par la formule suivante :

$$ET = 0.258 \cos x - 7.416 \sin x - 3.648 \cos 2x - 9.228 \sin 2x \quad (I.5)$$

Avec :

$$x = \frac{360(n-1)}{360 * 25}$$

Où l'angle x est défini en fonction du numéro du jour n . Le décompte commence à partir du 1er janvier où $n=1$.

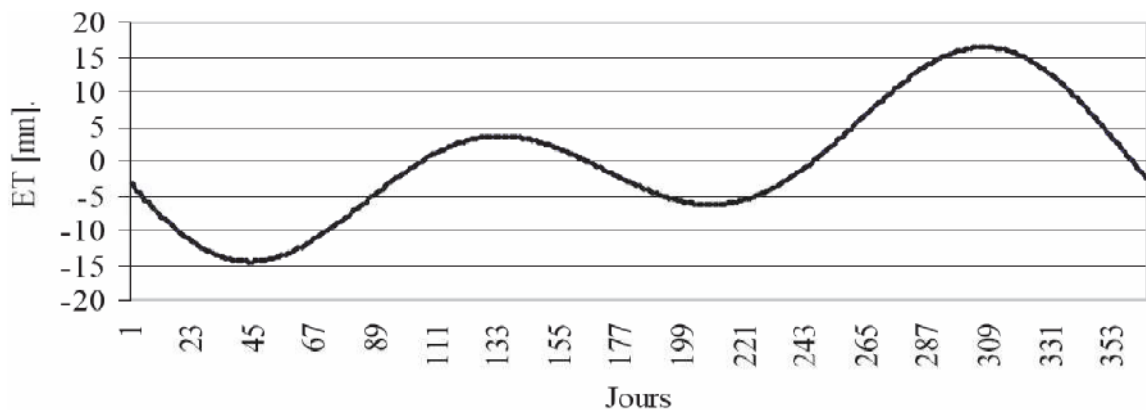


Fig.1.5 : Variations annuelles de l'équation du temps

I.3.4. Le temps solaire vrai et l'angle horaire du soleil : [2]

La notion du temps solaire vrai **TSV** a une liaison avec l'angle horaire ω , qui représente l'arc compris entre le rayonnement solaire incident et le plan méridien du lieu. Cet angle augmente de quinze degrés (15°) par heure. La valeur zéro degré (0°) est atteinte au passage du soleil à la verticale (zénith) du plan méridien (midi solaire vrai = 12 h **TSV**).

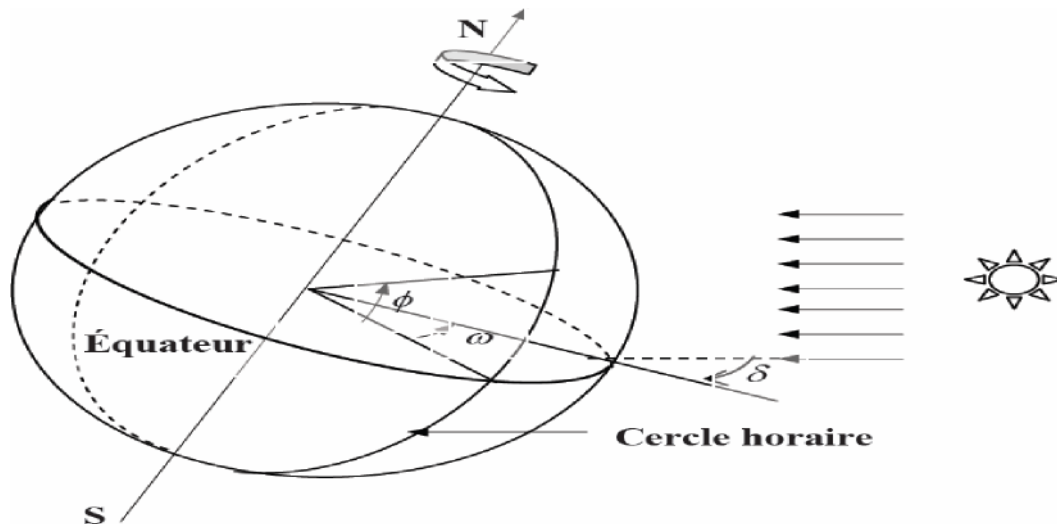


Fig. I.6 : L'angle horaire et la déclinaison

L'angle horaire est compté négativement avant midi TSV, et positivement après midi.

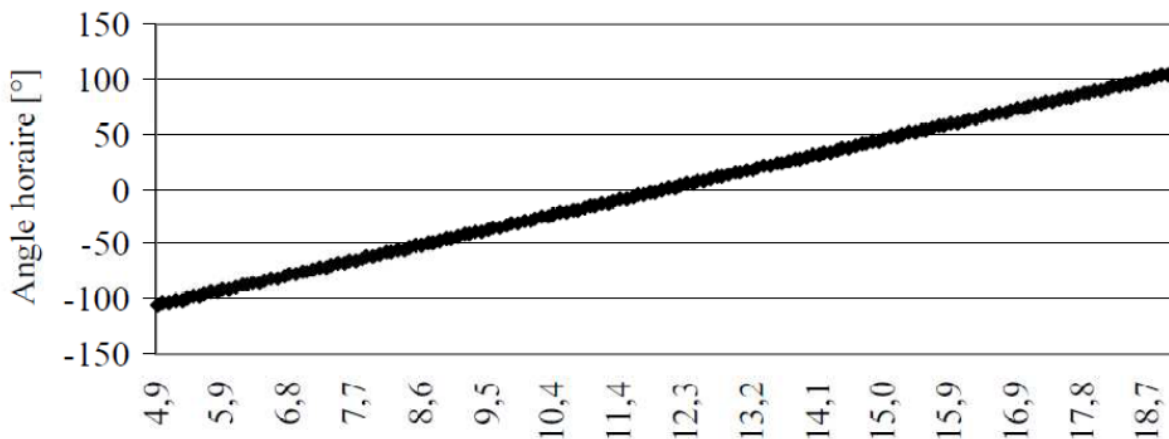


Fig. I.7 : Variation journalière de l'angle horaire

La relation directe entre TSV et l'angle horaire ω du soleil est donnée par :

$$\omega = 15^\circ (\text{TSV} - 12) \quad (\text{I.6})$$

Où ω est mesuré en degrés et TSV en heures.

➤ **Le temps solaire moyen TSM**

Temps défini par les coordonnées angulaires d'un soleil fictif qui serait animé d'une vitesse constante sur l'Ecliptique.

➤ **Le temps solaire vrai TSV**

Temps défini par les différentes coordonnées angulaires du soleil. Il est lié au temps solaire moyen TSM par l'équation du temps ET avec un maximum de 16 minutes.

➤ **Le temps universel TU**

Temps solaire moyen du méridien de Greenwich (GMT).

$$\text{TSV} = \text{TSM} + \text{ET} \quad (\text{I.7})$$

$$\text{TSM} = \text{TU} + \frac{\lambda}{15} \quad (\text{I.8})$$

En déduit :

$$\omega = 15 \left(\text{TU} + \frac{\lambda}{15} + \text{ET} - 12 \right) \quad (\text{I.9})$$

Où λ et ω sont exprimés en degrés (λ positif pour les longitudes Est) TU et ET sont exprimés en heures et dixièmes d'heure.

I.3.5. Hauteur angulaire du soleil h : [2]

C'est l'angle formé par le plan horizontal du lieu d'observation avec la direction du soleil. Cette hauteur durant le jour peut varier de 0° (soleil à l'horizon) à 90° (soleil au zénith).

La hauteur angulaire du soleil h est alors donnée par la formule :

$$\sin h = \sin \varphi \sin \delta + \cos \varphi \cos \delta \cos \omega \quad (\text{I.10})$$

Où :

φ : Latitude du lieu ;

δ : La déclinaison du soleil ;

ω : L'angle horaire du soleil.

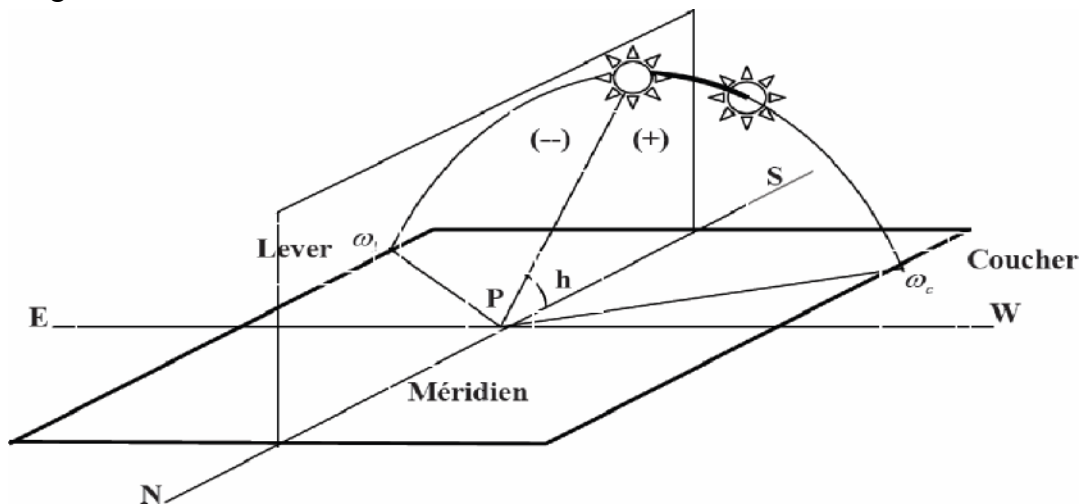


Fig. I.8 : Angles solaires

I.3.6. Azimut du soleil a : [2]

C'est l'angle compris entre le méridien du lieu et le plan vertical passant par le soleil. La connaissance de l'azimut est importante pour le calcul de l'angle d'incidence des rayons

sur une surface non horizontale, l'azimut nul correspond à la direction sud dans l'hémisphère nord et la direction nord dans l'hémisphère sud. L'orientation Est correspond à l'azimut $a = -90^\circ$, et l'orientation Ouest à $a = +90^\circ$.

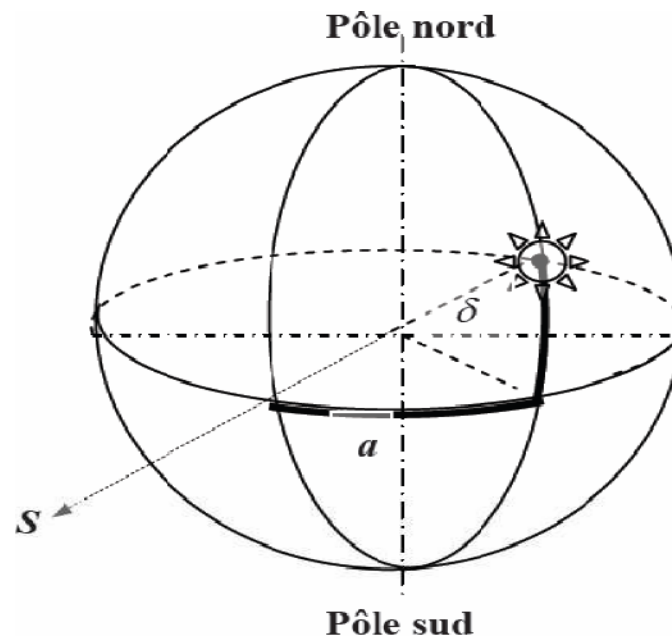


Fig. I.9 : Représentation de la déclinaison et de l'azimut.

L'azimut a est défini par les relations suivantes :

$$\sin a = \frac{\cos \delta \sin \omega}{\cosh} \quad (\text{I.11})$$

Ou :

$$\cos a = \frac{\sin \varphi \sinh - \sin \delta}{\cos \varphi \cosh} \quad (\text{I.12})$$

Ou bien :

$$\cos a = \frac{\sin \varphi \cos \delta \cos \omega - \cos \varphi \sin \delta}{\cosh} \quad (\text{I.13})$$

I.3.7. Définition :

II.3.2. Durée d'insolation :

L'insolation ou la durée d'ensoleillement est un paramètre temporel caractérisant le rayonnement solaire. Elle représente pour une journée la somme des intervalles de temps auxquels l'intensité du rayonnement solaire a dépassé un seuil de 100 W/m^2 , il est représenté par (SS).

I.3.7.2 Insolation potentielle (théorique) :

L'insolation potentielle ou théorique (SS_0) est la valeur de l'insolation pour le jour considérée en l'absence d'atmosphère, elle ne dépend que de la position géographique du lieu.

$$SS_0(n) = \frac{2}{15} \arccos(-\operatorname{tg} \varphi \operatorname{tg} \delta) \quad (\text{I.14})$$

I.3.7.3. Fraction d'insolation :

La fraction d'insolation σ , est un paramètre très représentatif des conditions climatiques de nébulosité du ciel. La nébulosité est le rapport entre la surface du ciel couverte par les nuages et la surface totale du ciel au dessus du territoire correspondant.

Cette notion n'étant que descriptive, on la relie à la fraction d'insolation qui est une grandeur mesurable dès qu'on connaît les durées d'insolation enregistrées par les héliographes qui s'en déduits par le rapport suivant : SS_0

$$\sigma = \frac{SS}{SS_0} = \frac{\text{durée d'insolation}}{\text{durée maximale d'insolation}} \quad (\text{I.15})$$

I.3.8. Décalage horaires : [2]

Les relations se rapportant au mouvement du Soleil utilisent le temps solaire TS qui diffère généralement du temps légal TL (heure des montres) du lieu considéré. Cette différence est liée à :

La différence (fixée par chaque pays) entre l'heure légale TL et l'heure civile TCF correspondant au fuseau horaire adopté par le pays :

$$C = TL - TCF \quad (\text{I.16})$$

L'heure civile TCF du fuseau horaire est égale au temps universel TU (temps solaire méridien De Greenwich) augmenté de la valeur du décalage horaire fixé.

I.3.9. Fuseau horaire : [2]

Secteur de la surface terrestre compris entre deux méridiens distants de 15° de longitude et pour lequel, par convention, l'heure indiquée par le fuseau diffère d'un nombre entier d'heures de celle indiquée par le temps universel.

A ce concept est lié celui de la ligne de changement de date. L'heure légale d'un pays est généralement rattachée à l'heure du fuseau recouvrant la majorité de ce pays.

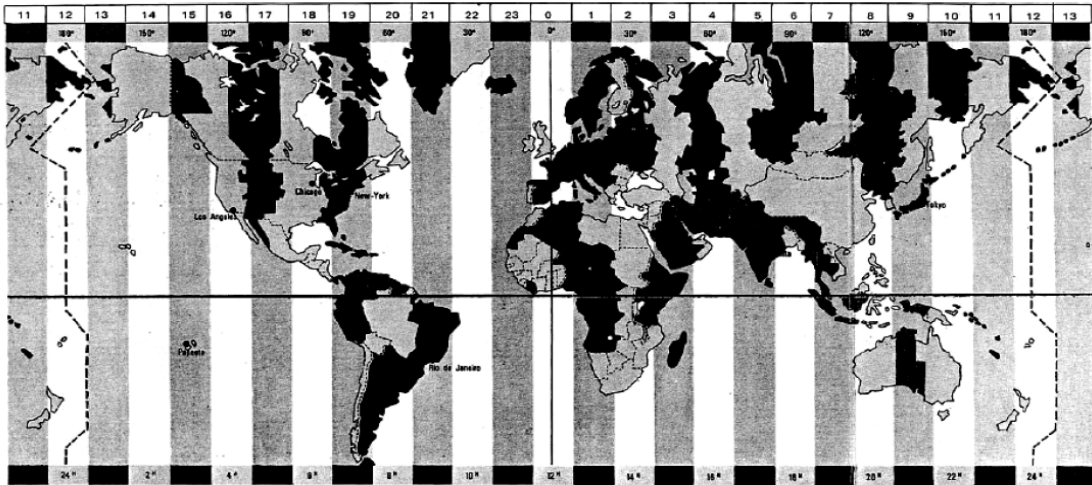


Fig.1.10 : Décalage horaire par rapport au méridien de Greenwich

I.4. ECLAIREMENT D'UN RECEPTEUR PLAN : [3]

Le coefficient d'incidence $\cos \gamma$ est l'angle formé par le rayonnement solaire incident avec la perpendiculaire issue de la surface considérée. Ce coefficient est défini d'une part par la hauteur du soleil et son azimut et d'autre part par l'orientation (points cardinaux) et l'inclinaison i du plan récepteur. Ainsi, chaque plan récepteur peut être défini par un couple de valeurs, soit (O, i) . L'orientation est négative vers l'Est et est positive vers l'Ouest, Quant à l'inclinaison, elle est égale à 0° pour un plan horizontal et 90° pour un plan vertical. Si le coefficient d'incidence est négatif, la surface du plan considéré ne reçoit pas de rayon solaire direct.

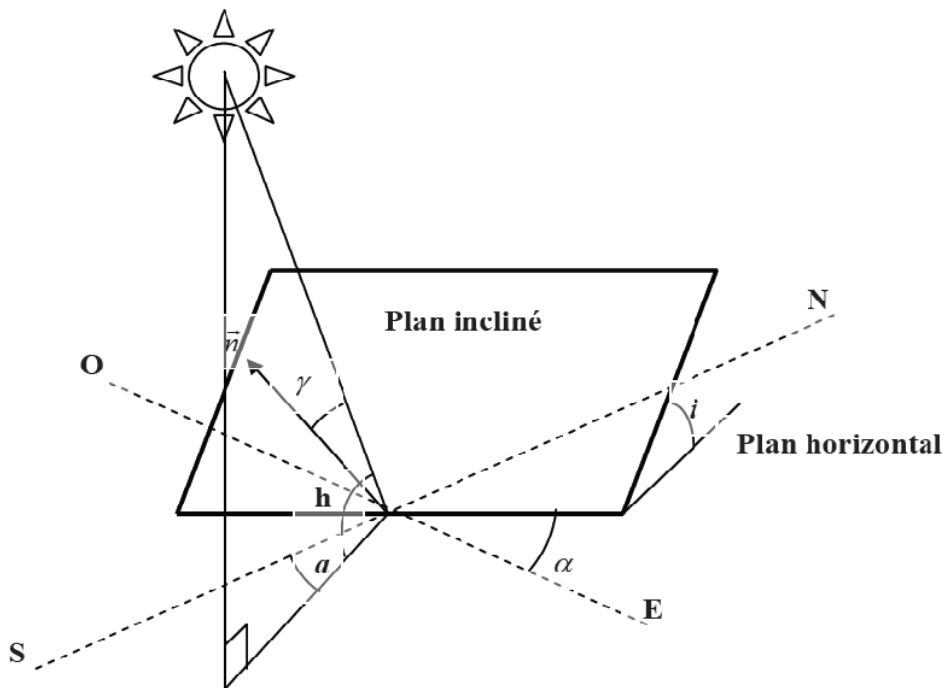


Fig. I.11 : Inclinaison et orientation d'une surface réceptrice

L'inclinaison sur l'horizontale est désignée par l'angle i compris entre 0° et 90° et par le plan azimutal α compris entre -180° et 0° vers l'Est et entre 0° et 180° vers l'Ouest.

L'éclairement lumineux (W/m^2) est maximal lorsque le rayonnement est perpendiculaire au plan ($\gamma=0$). L'angle d'incidence augmente jusqu'à être le rayonnement à incidence rasante ($\gamma=90$).

L'éclairement perpendiculaire à un plan, peut être calculé par la formule:

$$S = I_{DN} \cdot \cos \gamma \quad (\text{I.17})$$

I.4.1. Rayonnement global G:

Eclairement énergétique solaire reçu par une surface horizontale.

On estime le rayonnement global G reçu par une surface horizontale comme suit : [3]

$$G = (0,58 \sigma + 0,41) \cdot G^* \quad (\text{I.18})$$

Avec G^* est le rayonnement global du ciel clair, il est mesuré par un pyranomètre est donné dans des abaques.

I.4.2. Rayonnement diffus D :

Eclairement énergétique solaire dirigé vers le sol reçu par une surface horizontale, provenant de tout l'hémisphère à partir de l'angle solide limité au disque solaire.

$$D = (-0,35 \sigma + 0,53) \cdot G \quad (\text{I.19})$$

On estime le rayonnement direct I reçu par une surface horizontale comme suit :

$$I = G - D \quad (\text{I.20})$$

➤ Estimation des différents rayonnements sur une surface inclinée

On estime le rayonnement diffus $D(\beta, \gamma)$ reçu par une surface inclinée d'un angle β et orientée par rapport au sud d'un angle γ comme suit :

$$D(\beta, \gamma) = D \cdot \cos^2 \beta/2 + a \cdot G \cdot \sin^2 \beta/2 \quad (\text{I.21})$$

a : albédo [9]

On estime le rayonnement direct $I(\beta, \gamma)$ reçu par une surface inclinée comme suit :

$$I(\beta, \gamma) = \lambda(\beta, \gamma) \cdot I \quad (\text{I.22})$$

$\lambda(\beta, \gamma)$ est donnée sous forme d'abaques, il est calculée pour $6 \geq T_L \geq 2$ et $\varphi \leq 60^\circ$.
On estime le rayonnement global $G(\beta, \gamma)$ reçu par une surface inclinée comme suit :

$$G(\beta, \gamma) = \lambda(\beta, \gamma) \cdot I + D \cdot \cos^2 \beta/2 + a \cdot G \sin^2 \beta/2 \quad [\text{3}] \quad (\text{I.23})$$

I.4.3. Instrument de mesure d'éclairement :

I.4.3.1. Mesures effectuées par un Pyranomètre : [4]

Mesure de l'éclairement énergétique global.

Mesure de l'éclairement énergétique diffus par adjonction d'un dispositif d'occultation du disque solaire.

➤ Principe

L'élément sensible (thermopile) du Pyranomètre est une série de thermocouples exposés au rayonnement solaire, dont les soudures froides sont maintenues à la température de l'air par conduction et qui délivre une différence de potentiel proportionnelle au flux incident.

Un pare-soleil constitué par une bande circulaire centrée sur la thermopile et parallèle au plan équatorial, occulte le Pyranomètre du rayonnement solaire direct pour permettre la mesure du rayonnement solaire diffus.

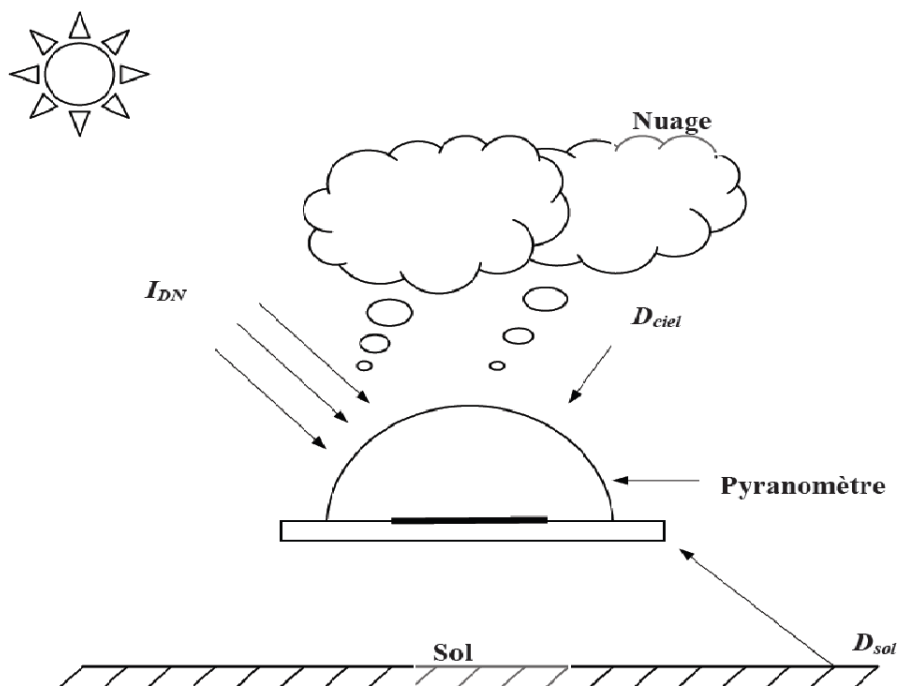


Fig. I.12 : Mesure du rayonnement Global G

I.4.3.2. Pyrhéliomètre et rayonnement Direct : [5]

➤ Définition du rayonnement solaire Direct I_{DN}

C'est l'éclairement énergétique solaire contenu dans l'angle solide limité au disque solaire et parvenant sur une surface perpendiculaire à l'axe de cet angle solide.

➤ Mesure effectuée par un Pyrhéliomètre

Mesure de l'éclairement énergétique direct. Rayonnement solaire provenant de l'angle solide limité au disque solaire parvenant sur une surface unité perpendiculaire à l'axe de cet angle solide.

➤ Principe

L'élément sensible (thermopile) du Pyrhéliomètre est constitué de thermocouples montés en série, exposés au rayonnement solaire et dont les soudures froides sont maintenues à la température de l'air par conduction. Il délivre une différence de potentiel proportionnelle au flux incident. La géométrie de l'appareil limite le rayonnement incident au rayonnement solaire direct et au rayonnement provenant du ciel circumsolaire.

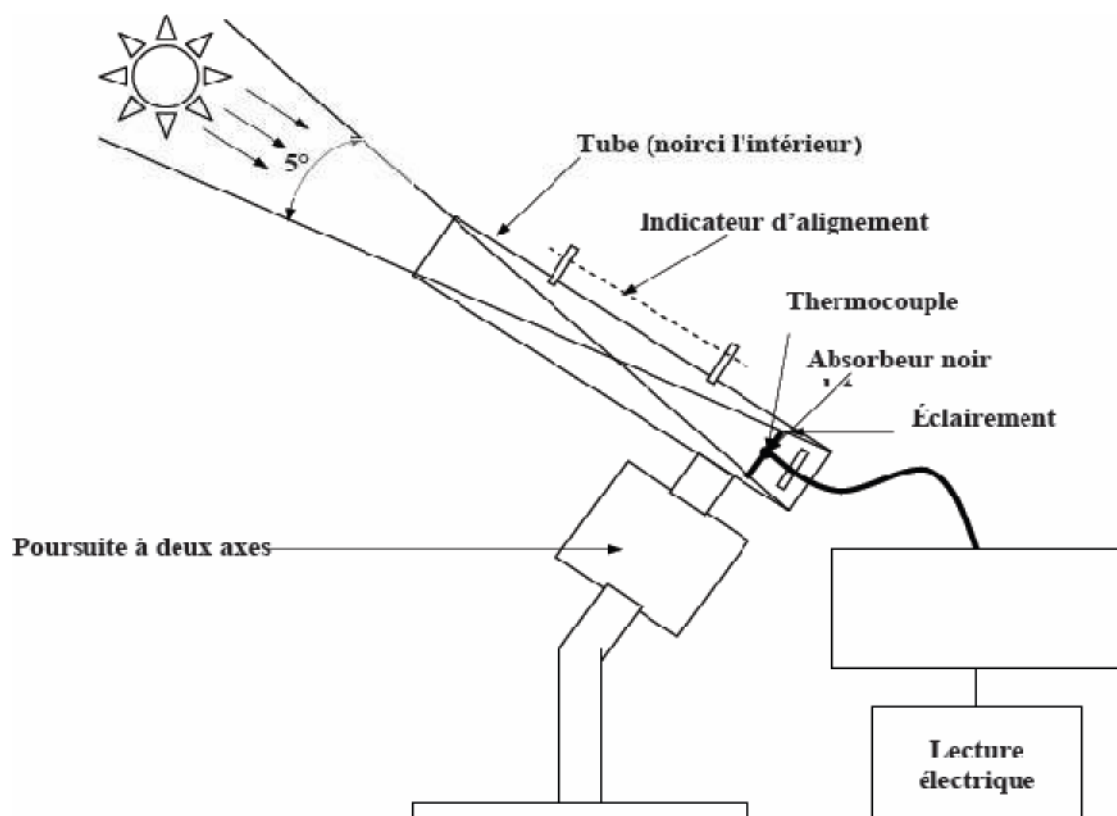


Fig. I.13 : Une incidence normale de Pyrhéliomètre utilisé pour mesurer la composante du rayonnement solaire direct.

I.4.4.L'effet de l'atmosphère sur le rayonnement solaire :

Lors de son trajet à travers l'atmosphère, le rayonnement solaire subit diverses influences :

Diffusion par les molécules composant les gaz atmosphériques (diffusion de Rayleigh, Mie). Elle affecte les courtes longueurs d'onde du spectre solaire (loi de variation en λ^{-4}) ; ce qui explique la couleur bleue du ciel.

Absorption par les gaz atmosphériques (oxygène O_2 , ozone O_3) dans le domaine des courtes longueurs d'ondes (vapeur d'eau...) et dans celui des grandes longueurs d'onde (gaz carbonique...).

Diffusion par les aérosols est les microparticules en suspension dans l'atmosphère, ainsi que par les microcristaux et les gouttelettes constituant les nuages, toutes les longueurs d'ondes sont affectées, ce qui cause parfois des troubles atmosphériques.

I.5. ESTIMATION DE L'ECLAIREMENT SOLAIRE : [2]

I.5.1. Définition :

L'éclairement solaire est défini comme étant la puissance (W/m^2) reçue par unité de surface réceptrice plongée dans un flux énergétique.

L'énergie solaire (constance solaire moyenne à l'entrée de l'atmosphère, $1367 W/m^2$) subit une dégradation lorsqu'elle traverse l'atmosphère, une partie seulement de cette énergie est disponible au sol. Ce rayonnement solaire se décompose en deux parties principales qui sont le rayonnement solaire direct (I_{DN}) et le rayonnement solaire diffus (D). La somme de ces deux rayonnements est appelée : rayonnement solaire global (G).

I.5.2. Variation de l'éclairement solaire direct normal selon les conditions climatiques :

1. I_{DN} diminue de 3 à 5% lorsque, à hauteur angulaire égale. L'épaisseur de l'eau condensable varie du simple au double.

2. I_{DN} diminue d'environ $100W/m^2$ lorsque β varie de 0,05 à 0,15 pour des hauteurs du soleil comprises entre 10 et 90°.

3. I_{DN} diminue d'environ $150W/m^2$ si β varie de 0,10 à 0,20.

Où : β est le coefficient de trouble atmosphérique.

Ces expressions empiriques ont été obtenues par analyse de nombreuses mesures météorologiques réalisées (C. Perrin de Brichambaut) :

Tableau. I.3 : Expressions empiriques des éclairagements solaires par, ciel clair mais pour trois Conditions de troubles en fonction la hauteur solaire [3].

| Condition de troubles | I_{DN} [W/m^2] | G [W/m^2] |
|-----------------------|--|------------------------|
| Conditions normales | $1230 \exp\left[-\frac{1}{3.8 \sin(h+1.6)}\right]$ | $1130 (\sin h)^{1,15}$ |
| Ciel très pur | $1210 \exp\left[-\frac{1}{6 \sin(h+1)}\right]$ | $1080 (\sin h)^{1,22}$ |
| Zone industrielle | $1260 \exp\left[-\frac{1}{2.3 \sin(h+3)}\right]$ | $995 (\sin h)^{1,25}$ |

La figure I.14 montre la variation de l'éclairage solaire direct en fonction de la hauteur solaire pour des différentes conditions de troubles.

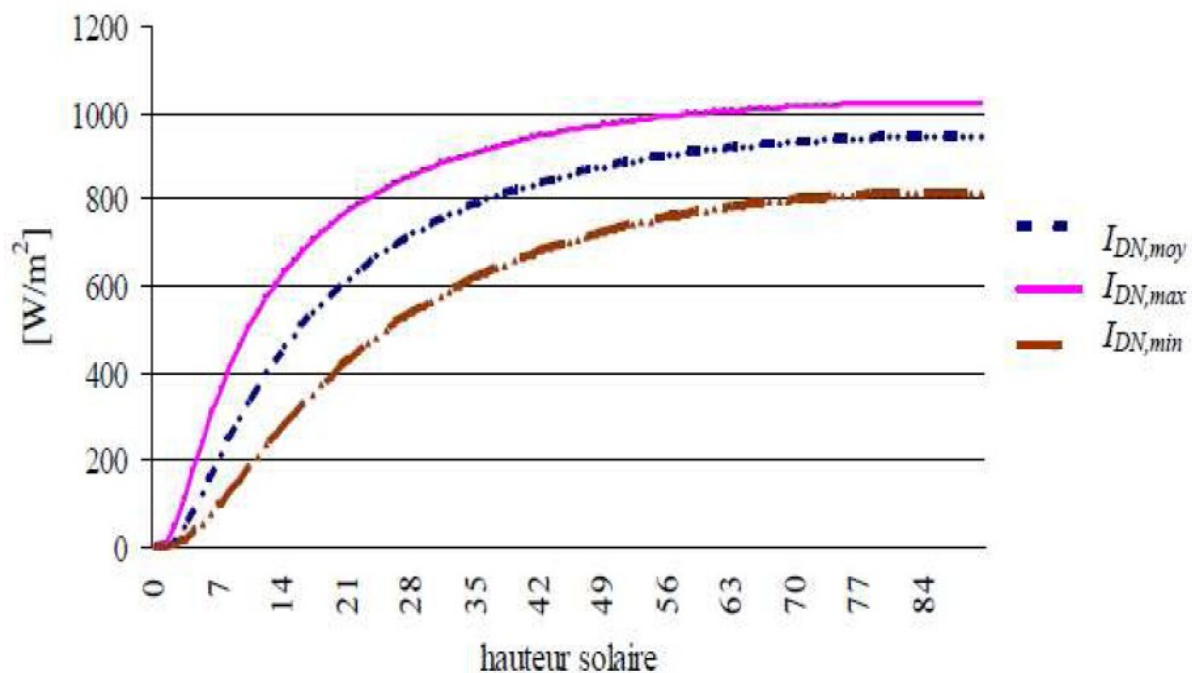


Fig. I.14 : Valeurs du rayonnement direct I_{DN} en fonction de la hauteur du soleil pour conditions moyennes et extrêmes de trouble.

I.6. LE PLANCHER SOLAIRE

I.6.1. Définitions :

I.6.1.1. Plancher chauffant basse température : dispositif de chauffage intégré à une dalle de béton. Cet émetteur est dimensionné pour que sa température de surface reste modérée [6].

I.6.1.2. Plancher solaire direct (PSD®) : marque commerciale désignant un type de système solaire combiné très répandu en France à ce jour. Il associe des capteurs solaires thermiques et un plancher chauffant basse température servant à la fois de stockage et d'émetteur de chaleur, sans échangeur intermédiaire [6].

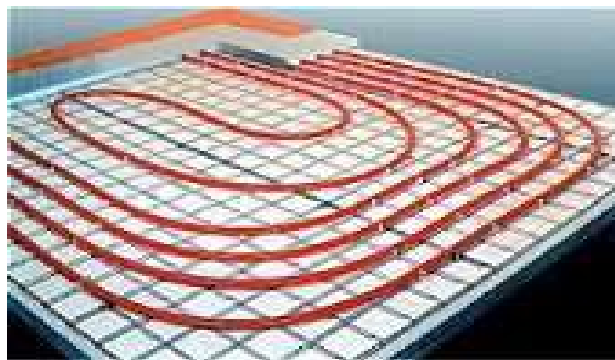


Fig. I.15: Le plancher solaire direct (PSD®) [7]

I.6.1.3. Capteur solaire thermique : coffre rigide et vitré à l'intérieur duquel une plaque et des tubes métalliques noirs (absorbeur) reçoivent le rayonnement solaire et chauffent un liquide caloporteur (Antigel). Certains capteurs, conçus pour être assemblés sur chantier, sont fournis en « pièces détachées ». Quand ils sont « intégrés » ou « incorporés » en toiture, les capteurs assurent également une fonction de couverture du bâtiment [6].

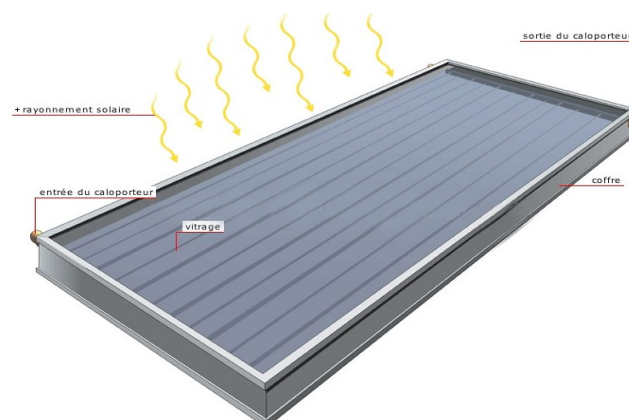


Fig. I.16: Capteur solaire thermique [8]

I.6.1.4.Liquide caloporteur : il s'agit la plupart du temps d'un mélange d'eau et d'antigel, assurant le transport de l'énergie thermique du capteur vers le ballon d'ECS ou vers le système de chauffage [6].

ECS : eau chaude sanitaire.

I.6.1.5.Énergie d'appoint : énergie utilisée pour compléter ou relayer l'énergie solaire en cas d'ensoleillement insuffisant ou nul ; ce peut être le gaz, le fioul, le bois, l'électricité... [6].

➤ **Des besoins contrastés [6]**

Le système solaire combiné est toute fois plus complexe à mettre en œuvre car le chauffage des locaux et la fourniture d'eau chaude domestique n'obéissent pas aux mêmes exigences :

- on a besoin d'eau chaude au robinet tout au long de l'année, alors que la demande de chauffage varie fortement selon les saisons ;
- lorsque le chauffage est en marche, la demande journalière de chaleur est relativement continue. À l'inverse, celle d'eau chaude sanitaire est irrégulière : des pointes de courte durée alternent avec de longues périodes sans demande ;
- la température de l'eau utilisée dans le circuit de chauffage est plutôt basse (entre 30 et 50 °C), alors que l'eau sanitaire est beaucoup plus chaude (entre 45 et 60 °C).

C'est pourquoi, pour satisfaire ces besoins contradictoires, de multiples solutions plus ou moins sophistiquées, novatrices et inventives ont pu voir le jour dans différents pays.

I.6.1.6.système solaire combiné : Comme toute installation de chauffage central, un système solaire combiné comporte : [6]

- une « **chaudière** », en l'occurrence des capteurs solaires thermiques analogues à ceux qui alimentent un chauffe-eau solaire ;
- une **distribution**, par un réseau de tuyauteries semblable à celui utilisé dans les systèmes classiques ;
- un (ou des) **dispositif(s)** de stockage de l'énergie thermique (ballon-tampon, dalle de béton);
- des **émetteurs de chaleur** (radiateurs basse température, dalle chauffante, etc.) ;
- une **régulation**.

Un **système d'appoint** permet de pallier les insuffisances du rayonnement. Il peut être totalement indépendant de l'installation solaire : cheminée, poêle à bois, convecteurs électriques, etc.

Il peut aussi être couplé à la partie solaire de l'installation. Ainsi, la régulation peut gérer la mise en route et l'arrêt de l'appoint, en fonction de l'ensoleillement, de la demande de chauffage ou d'eau chaude sanitaire. Dans ce cas, on utilise une chaudière classique (fioul, gaz, bois, électrique). [6]

Il existe deux grands types de systèmes solaires combinés avec des variantes permettant de s'adapter à la majorité des cas :

I.6.1.6.a .Le plancher solaire direct (PSD®) : [6]

Ce type de système solaire combiné est couramment installé aujourd'hui en France. Le principe est simple : un liquide caloporteur est chauffé dans des capteurs solaires thermiques ; il circule directement dans des tuyaux d'un plancher chauffant ou réchauffe le ballon d'ECS par l'intermédiaire d'un échangeur de chaleur. Il repart ensuite vers les capteurs où il est chauffé à nouveau, et ainsi de suite tant que l'ensoleillement est suffisant.

L'appoint peut être indépendant ou couplé.

Dans les deux cas, **la dalle chauffante** joue un double rôle de stockage et d'émetteur de chaleur. Alimentée par le liquide caloporteur réchauffé (plancher chauffant à basse température), bien isolée, elle permet d'obtenir une température douce et uniforme dans toutes les pièces de la maison.

I.6.1.6.b. Le système à hydro-accumulateur : [6]

Le soleil n'étant pas présent toute la journée ni toute l'année, l'idée consiste à stocker la chaleur produite par les capteurs dans un volume d'eau tampon, dans lequel on vient puiser lorsque cela est nécessaire.

L'énergie nécessaire au chauffage est diffusée dans la maison soit grâce à des radiateurs, de préférence fonctionnant à basse température, soit grâce à un plancher chauffant.

Les progrès de la recherche, notamment sur la régulation et la gestion du stockage de l'énergie dans les ballons, permettent de réaliser aujourd'hui des systèmes performants et compacts dont le volume est acceptable (de 500 à 2000 l).

I.6.2.Principe et schéma de fonctionnement : [6]

➤ Produire

Des capteurs solaires thermiques permettent de transformer le rayonnement solaire en chaleur. Certains capteurs, conçus comme des éléments de toiture, s'intègrent visuellement très bien aux constructions.

De préférence orientés plein sud et inclinés avec un angle de l'ordre de 45°, ils pourront néanmoins, sans réduction trop importante des performances, avoir une orientation allant du sud-est au sud-ouest, et une inclinaison comprise entre 30 et 60°.

En cas de doute sur les ombres portées par les montagnes ou les immeubles environnants, une étude détaillée permettra d'en chiffrer l'influence.

• Principe du plancher solaire direct (PSD®)

Le liquide caloporteur, arrivant chaud des capteurs thermiques, passe directement dans la dalle et repart vers les capteurs.

La dalle stocke la chaleur et la transmet à la pièce. Un circuit de dérivation permet de produire l'eau chaude sanitaire.

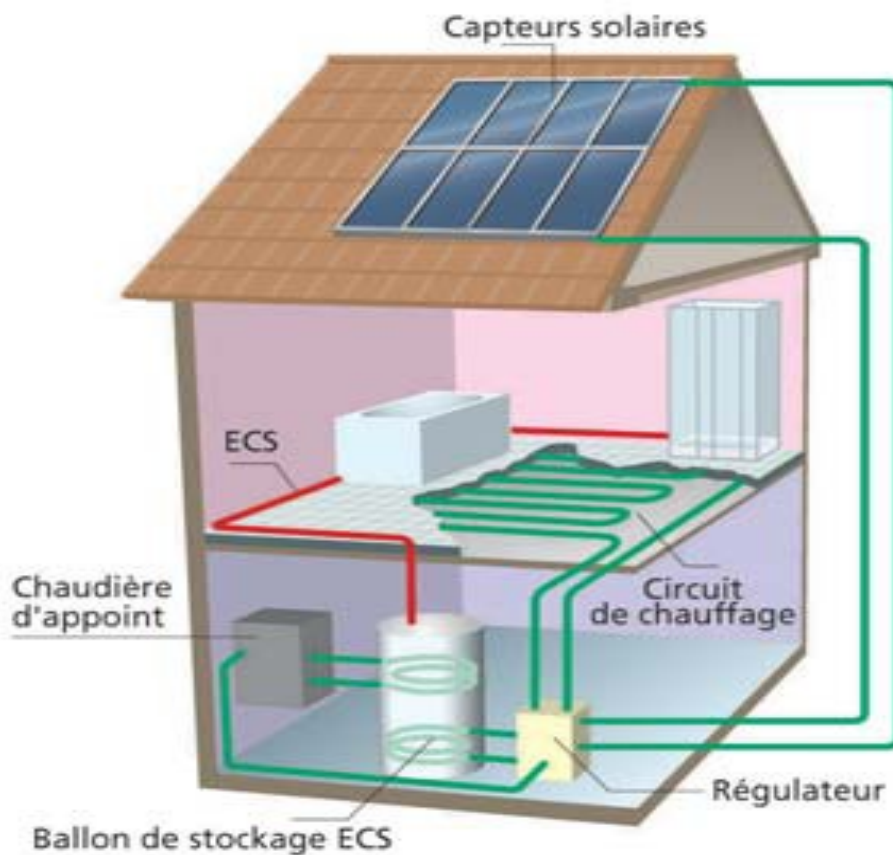


Fig. I.17. : Principe du plancher solaire direct (PSD®)

En vert : circuit où circule l'antigel.

En rouge : circuit d'eau chaude sanitaire.

➤ Stocker et restituer

Dans les systèmes du type plancher solaire direct (PSD®), c'est l'émetteur de chaleur, c'est à dire la dalle de béton, qui va assurer le stockage de l'énergie et permettre une diffusion de la chaleur au cours de la nuit.

Les autres systèmes fonctionnent selon le principe suivant: lorsqu'il y a du soleil, la chaleur est stockée dans un réservoir d'eau tampon par le biais d'un échangeur de chaleur. Cette eau ainsi réchauffée est utilisée pour le chauffage des bâtiments à l'aide d'émetteur basse température. L'eau chaude sanitaire peut être produite soit dans un ballon immergé dans le volume tampon, soit par l'intermédiaire d'un échangeur de chaleur situé dans le ballon de stockage ou à l'extérieur de celui-ci.

• Principe des autres systèmes combinés

Le liquide caloporteur chauffe l'eau du réservoir et repart vers les capteurs. L'eau du réservoir sert pour alimenter le système de chauffage. L'eau chaude sanitaire est produite dans un ballon immergé ou par un échangeur de chaleur.

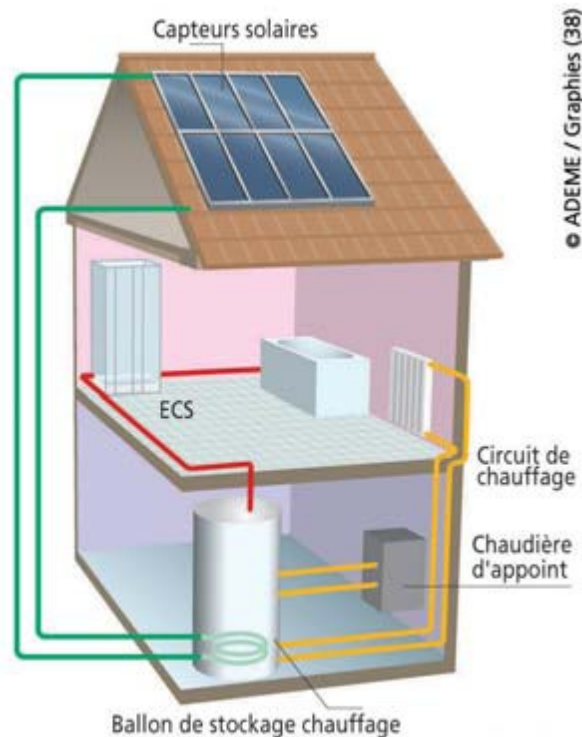


Fig. I.18: Principe des autres systèmes combinés

➤ **Réguler**

La régulation est un élément indispensable au bon fonctionnement du système. Son rôle est de donner la priorité à l'énergie solaire chaque fois que celle-ci est disponible.

Elle doit aussi moduler l'énergie d'appoint à apporter pour maintenir la température de confort sans ensoleillement et assurer la production d'eau chaude sanitaire suffisante.

➤ **Maîtriser les surchauffes estivales**

La surface de capteurs est largement suffisante pour assurer les besoins d'eau chaude sanitaire des occupants pendant l'été. Si les habitants partent en vacances pendant cette période, les capteurs, qui n'ont plus de besoins à couvrir, peuvent atteindre des températures très élevées.

Pour maîtriser ces éventuelles surchauffes, les constructeurs ont imaginé différents systèmes: boucles de décharge, capteurs autovidangeables, refroidissement nocturne, circuit sous haute pression pour éviter l'ébullition du liquide caloporteur, ou autre procédé permettant d'éviter toute dégradation du matériel.

I.6. CONCLUSION :

Dans ce chapitre sont présentés les notions importantes sur le gisement solaire comme les Coordonnées terrestres et horaires, les temps de base et le mouvement de la terre autour du soleil.

Aussi présenté les différents types de rayonnements (direct, diffus et global) et les expressions mathématiques de chaque rayonnement selon la variation d'inclinaison et d'orientation ainsi on a donné une définition du chauffage solaire par dalle chauffante ou bien le chauffage solaire direct.

Une exploitation rigoureuse du gisement solaire permet l'orientation optimale des capteurs solaires.

CHAPITRE II
NOTIONS DE TRANSFERT
DE CHALEUR

II.1.INTRODUCTION

L'objectif visé dans ce chapitre consiste à faire des rappelles théoriques sur les équations du transfert thermique et les lois physiques de base qu'on peut utiliser dans le dimensionnement des mécanismes du système de chauffage par dalle chauffante et établir un bilan thermique d'une maison individuelle afin de calculer les différentes déperditions thermiques dans les conditions de base correspondantes au confort et au milieu extérieur.

II.2.GENERALITES SUR LES TRANSFERTS DE CHALEUR

II.2.1. Introduction :

La thermodynamique permet de prévoir la quantité totale d'énergie qu'un système doit échanger avec l'extérieur pour passer d'un état d'équilibre à un autre.

La thermique (ou thermocinétique) se propose de décrire quantitativement (dans l'espace et dans le temps) l'évolution des grandeurs caractéristiques du système, en particulier la température, entre l'état d'équilibre initial et l'état d'équilibre final [9].

II.2.2.Définitions : [9]

II.2.2.1.Champ de température :

Les transferts d'énergie sont déterminés à partir de l'évolution dans l'espace et dans le temps de la température : $T = f(x,y,z,t)$. La valeur instantanée de la température en tout point de l'espace est un scalaire appelé champ de température. Nous distinguerons deux cas :

- Champ de température indépendant du temps : le régime est dit permanent ou stationnaire.
- Evolution du champ de température avec le temps : le régime est dit variable ou transitoire.

II.2.2.2.Flux de chaleur :

On appelle flux de chaleur la quantité de chaleur transmise sur la surface S par unité de temps:

$$\mathbf{q} = \frac{dQ}{dt} \quad (\text{II.1})$$

Q : la quantité de chaleur transmise sur S ;

t : le temps.

II.2.3.Bilan d'énergie : [9]

Il faut tout d'abord définir un système (S) par ses limites dans l'espace et il faut ensuite établir l'inventaire des différents flux de chaleur qui influent sur l'état du système et qui peuvent être:

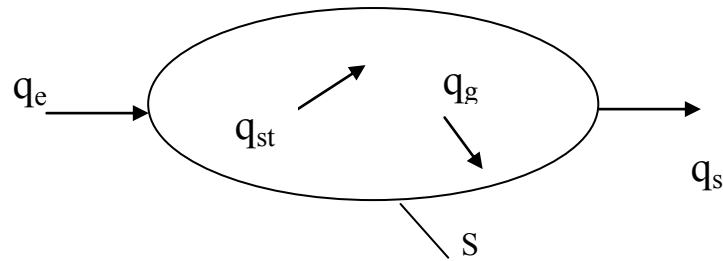


Fig. II.1: système et bilan énergétique

q_{st} : flux de chaleur stocké
 q_g : flux de chaleur généré
 q_e : flux de chaleur entrant
 q_s : flux de chaleur sortant

| dans le système S

On applique alors le 1er principe de la thermodynamique pour établir le bilan d'énergie du système (S) :

$$q_e + q_g = q_s + q_{st} \quad (\text{II.2})$$

➤ *Stockage d'énergie*

Le stockage d'énergie dans un corps correspond à une augmentation de son énergie interne au cours du temps d'où (à pression constante et en l'absence de changement d'état) :

$$q_{st} = \rho * V * C_p * \frac{dT}{dt} \quad (\text{II.3})$$

Avec :

q_{st} : Flux de chaleur stocké (W) ;

ρ : masse volumique (kg m^{-3}) ;

V : Volume (m^3) ;

C_p : Chaleur spécifique ($\text{J kg}^{-1} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$) ;

T : Température ($^\circ\text{C}$) ;

t : Temps (s).

➤ *Génération d'énergie*

Elle intervient lorsqu'une autre forme d'énergie (chimique, électrique, mécanique, nucléaire) est convertie en énergie thermique. On peut l'écrire sous la forme : [9]

$$\mathbf{q}_g = \dot{\mathbf{q}} * \mathbf{V} \quad (\text{II.4})$$

Avec :

\mathbf{q}_g : Flux d'énergie thermique générée (W) ;

$\dot{\mathbf{q}}$: Densité volumique d'énergie générée (W m^{-3}) ;

\mathbf{V} : Volume (m^3).

II.2.4.Expression des flux d'énergie : [9]

II.2.4.1.Conduction :

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

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

$$\mathbf{q} = -\lambda * \mathbf{S} * \frac{\partial T}{\partial X} \quad (\text{flux de chaleur monodirectionnel suivant } x) \quad (\text{II.5})$$

Avec :

\mathbf{Q} : Flux de chaleur transmis par conduction (W) ;

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

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

\mathbf{S} : Aire de la section de passage du flux de chaleur (m^2).

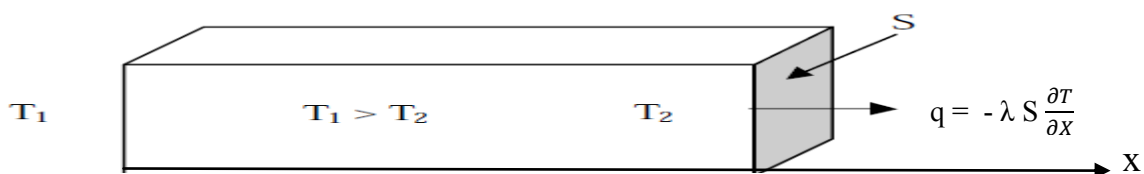


Fig. II.2: Schéma du transfert de chaleur conductif

Si la température n'est pas une fonction de « X » la formule de Fourier peut s'écrire aussi :

$$\mathbf{q} = -\lambda * \mathbf{S} * \frac{\Delta T}{\Delta X} = -\lambda * \mathbf{S} * \frac{T2 - T1}{e} \quad \text{avec: } \mathbf{R} = \frac{e}{\lambda * \mathbf{S}} \quad (\text{II.5})$$

$$R'' = \frac{e}{\lambda}$$

e : épaisseur du solide suivant la direction du transfert de chaleur ;

R : Résistance thermique du matériau.

Donc on peut écrire que :

$$q = \frac{T_1 - T_2}{R} \quad (\text{II.6})$$

➤ Analogie électrique

La relation de Fourier est analogue à la loi d'Ohm en électricité qui définit l'intensité du courant comme le rapport de la différence de potentiel électrique sur la résistance électrique.

La température apparaît ainsi comme un potentiel thermique et le terme $\frac{L}{\lambda S}$ apparaît comme la résistance thermique d'un mur plan d'épaisseur « e », de conductivité thermique λ et de surface latérale S . On se ramène donc au schéma équivalent représenté sur la figure II.3.

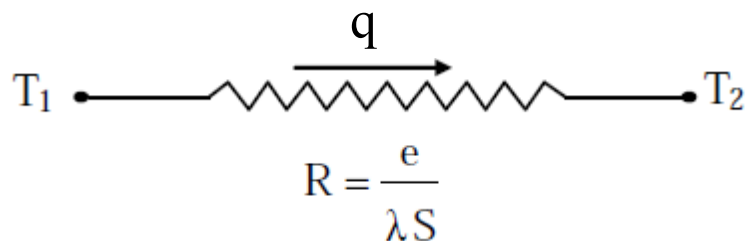


Fig. II.3: Schéma électrique équivalent d'un mur simple

➤ Résistance équivalente

On prend un mur maintenu à deux températures T_1 et T_2 constitué de deux couches disposées en série comme les montre la figure suivante :

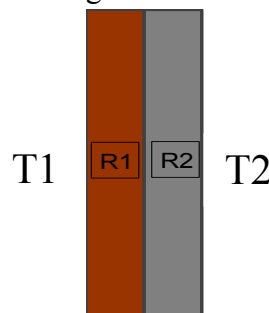


Fig. II.4 : couches de mur disposées en série

Les couches 1 et 2 ont des résistances thermiques qu'on désigne par R_1 et R_2 respectivement donc le système électrique équivalent est comme le montre cette figure :

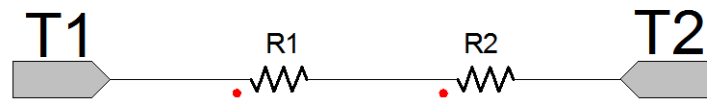


Fig. II.5 : schéma électrique équivalent

Le flux q transféré égale :

$$q = \frac{T1 - T2}{R_{eq}} \quad (II.7)$$

Donc la résistance équivalente s'écrit :

$$R_{eq} = R_1 + R_2$$

Si le mur est constitué de « N » couches :

$$R_{eq} = R_1 + R_2 + \dots + R_N \quad (II.8)$$

Maintenant les couches de mur sont disposées en parallèles comme les montre la figure :

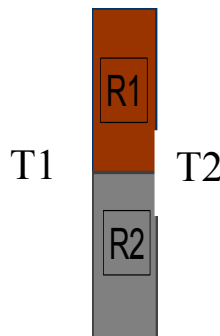


Fig. II.6 : couches de mur disposées en parallèle

Le schéma électrique équivalent :

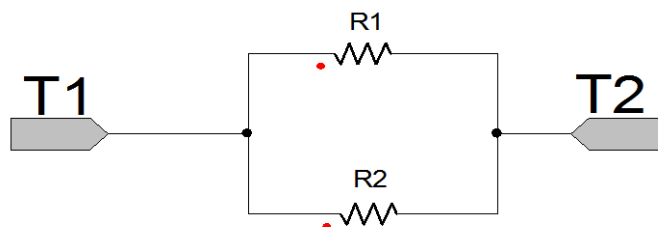


Fig. II.7 : schéma électrique équivalent

Le flux de chaleur transféré q de la formule (II.7) égale :

$$q = \frac{T_1 - T_2}{R_{eq}}$$

Donc la Resistance équivalente égale :

$$\frac{1}{R_{eq}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}$$

Le mur est constitué de N couches disposées en parallèles donc la résistance équivalente égale :

$$\frac{1}{R_{eq}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \dots + \frac{1}{R_N} \quad (\text{II.9})$$

II.2.4.2. Convection : [9]

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

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

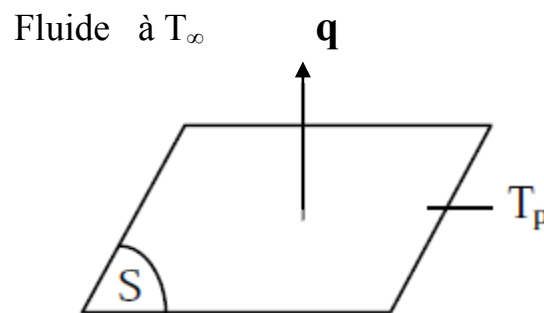


Fig. II.8 : Schéma du transfert de chaleur convectif

$$q = h \cdot S \cdot (T_p - T_\infty) \quad \text{avec :} \quad \frac{1}{R} = h \cdot S \quad (\text{II.10})$$

Avec :

q : Flux de chaleur transmis par convection (W) ;

h : Coefficient de transfert de chaleur par convection ($\text{W m}^\circ\text{C}^{-1}$) ;

T_p : Température de surface du solide ($^\circ\text{C}$) ;

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

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

R : Resistance thermique du fluide.

II.2.4.3. Rayonnement : [9]

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

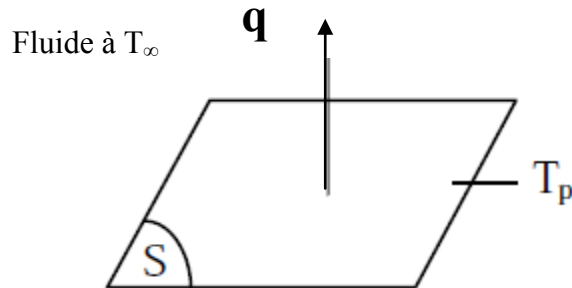


Fig. II.9 : Schéma du transfert de chaleur radiatif

$$\mathbf{q} = \sigma \cdot \epsilon_p \cdot \mathbf{S} \cdot (T_p^4 - T_\infty^4) \quad (\text{II.11})$$

Avec :

\mathbf{q} : Flux de chaleur transmis par rayonnement (W) ;

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

ϵ_p : Facteur d'émission de la surface ;

T_p : Température de la surface (K) ;

T_∞ : Température du milieu environnant la surface (K) ;

\mathbf{S} : Aire de la surface (m^2).

II.2.5. Flux de chaleur lié à un débit massique : [10]

Soit une conduite de $D_i \times D_e$ dans laquelle circule un fluide, à l'entrée le fluide a une température $T_{m,i}$ et sort à une température $T_{m,s}$ comme le montre la figure suivante :

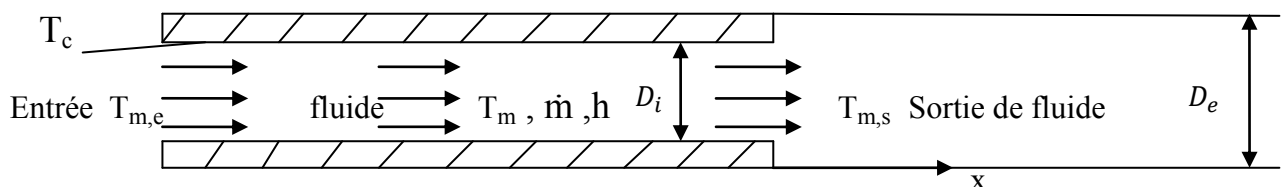


Fig. II.10 : Coupe d'un tube à l'intérieur circule un fluide

Lorsqu'un débit massique \dot{m} de matière entre dans le système à la température $T_{m,e}$ et en ressort à la température $T_{m,s}$ ($T_{m,e} > T_{m,s}$), on doit considérer dans le bilan un flux de chaleur sortant (perdu) à travers la surface latérale de la conduite correspondant: [10]

$$q = \dot{m} \cdot C_p \cdot (T_{m,e} - T_{m,s}) \quad (\text{II.12})$$

Avec :

q : Flux de chaleur entrant dans le système (W) ;

\dot{m} : Débit massique ($\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$) ;

C_p : Chaleur spécifique ($\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$) ;

$T_m(x)$: Température du fluide à un point x donné de la conduite ;

T_c : Température à l'intérieur de la conduite ;

D_i , D_e : diamètre intérieur et extérieur de la conduite respectivement .

La température $T_m(x)$ est donnée par la formule suivante : [10]

$$\frac{T_m(x) - T_c}{T_{m,e} - T_c} = \exp \left[\frac{-P \cdot h(x)}{\dot{m} \cdot C_p} x \right] \quad (\text{II.13})$$

Avec :

$h(x)$: coefficient de convection de fluide qui dépend de plusieurs paramètres ;

P : périmètre de la conduite.

Remarquons que le produit $P \cdot h(x)$ représente une résistance thermique par unité longueur donc :

$$R' = \frac{1}{P \cdot h(x)} \quad (\text{K} \cdot \text{m} \cdot \text{W}^{-1}) \quad (\text{II.14})$$

Maintenant la conduite est immergée sous une dalle (plancher) constituée de plusieurs couches avec une température de surface qu'on désigne par T_d , l'expression de $T_m(x)$ s'écrit :

$$\frac{T_m(x) - T_d}{T_{m,e} - T_d} = \exp \left[- \frac{1}{\dot{m} \cdot C_p \cdot R'_{eq}} x \right] \quad (\text{II.15})$$

$$R'_{eq} = \sum R'_{i \text{ couche}}$$

On pose que : $f = -\dot{m} C_p R'_{eq}$ donc :

$$\frac{T_m(x) - T_d}{T_{m,e} - T_d} = \exp\left[\frac{x}{f}\right] \quad (\text{II.16})$$

II.2.6. Déperditions : [11]

II.2.6.1. Les déperditions par transmission :

Les déperditions calorifiques par transmission se calculent pour chaque surface de l'enveloppe d'un local, cédant de la chaleur par convection, conduction et rayonnement.

Les parois de construction d'une maison ou d'un local sont différentes en épaisseurs (murs, portes, fenêtres et dalles). Le flux totale sortant de ces parois est égal à la somme algébrique des flux traversant ces parois.

Soit « S » la surface d'une paroi, séparant le local avec le milieu extérieur, le flux de déperdition par transmission à travers cette paroi est donné par la formule suivante tirée de la loi de fourier : [11]

$$q_T = K * S * (T_i - T_e) \quad (\text{II.17})$$

Avec :

K : Coefficient de transmission de la paroi ($W/m^2 \text{ } ^\circ C$) ;

T_i : Température de base intérieure ($^\circ C$);

T_e : Température de base extérieur ($^\circ C$).

II.2.6.2. Déperditions par infiltration :

La cause de ces déperditions est due à la différence entre la quantité de chaleur apportée par l'air froid qui s'infiltré dans le local et la quantité de chaleur emportée par l'air qui sort. Les déperditions par infiltration concernent les portes et les fenêtres, l'équation régissant celle-ci est donnée par : [11]

$$q_I = \sum (\alpha L) * C * H * (T_i - T_e) * (1 + Z_E) \quad (\text{II.18})$$

Avec :

α : Perméabilité du joint ($W/m \text{ } ^\circ C$) ;

L : Longueur du joint (m) ;

C : Constante du local ($R=0,9$) ;

H : Constante d'immeuble ($H=0,58$),

$Z_E = 0$ sauf lorsque la fenêtre est placée dans un angle on prend $Z_E = 0,2$.

II.2.6.3. Déperditions globales (coefficient GV) : [12]

Le coefficient **GV** d'un logement est égal à ses déperditions thermiques, pour un degré d'écart entre les températures intérieures et extérieures c'est-à-dire $T_i - T_e = 1^\circ\text{C}$, donc on a :

$$q_{\text{tot}} = q_T + q_I$$

$$\mathbf{GV} = q_{\text{tot}} / \Delta T \quad \mathbf{G} = q_{\text{tot}} / \Delta T * V \quad (\text{II.19})$$

Avec :

G : coefficients des déperditions volumique ($\text{W}/\text{m}^3 \text{ }^\circ\text{C}$) ;

V : volume habitable.

II.2.6.4. Déperditions dans un lieu donné pour la période hivernale: [12]

Les déperditions thermiques dans une journée donnée se calculent comme suit :

$$\mathbf{Q} = \mathbf{GV} * (\mathbf{T}_i - \mathbf{T}_e) * 24 \quad (\text{II.20})$$

Pour qu'on puisse connaître toutes les déperditions thermiques durant toute la période hivernale, on doit faire intervenir la notion des degrés-jours, autrement dit mesurer jour par jour l'écart entre la température ambiante prise à 21°C et la température moyenne minimale extérieure heure par heure, pour cela le nombre de degré du jour se calcule comme suit :

$$\mathbf{Ndj} = \sum_{i=1}^{31 \text{ Mars}} \text{er Nov} \left(20 - \frac{T_{\text{max}} + T_{\text{min}}}{2} \right) \quad (\text{II.21})$$

II.3. CONCLUSION

Ce chapitre a été consacré pour la présentation des lois de transfert thermique et aussi donner les lois de déperditions afin de calculer le bilan thermique hivernal d'une maison individuelle.

CHAPITRE III
DESCRIPTION DES
ELEMENTS DE
L'INSTALLATION

III.1.INTRODUCTION

Les rayonnements solaires sont apprivoisés de deux manières différentes, l'une permet l'acquisition d'électricité directe (capteur à cellule photovoltaïques ou photopile), l'autre sous forme d'énergies calorifiques au moyen d'un fluide caloporteur (capteur thermique).

L'énergie issue des capteurs photovoltaïques étant faible (rendement de 10% par rapport à l'énergie transmise); et du fait de conversion d'énergie pour l'obtention de calorie (effet joule), nous allons nous intéresser aux capteurs thermiques dont le rendement est supérieur à celui des photopiles et permet l'exploitation directe de l'énergie calorifique produite, ensuite on donne les lois qui régissent le dimensionnement des autres éléments de l'installation de chauffage solaire par dalle chauffante.

III.2: PRINCIPE DU CHAUFFAGE SOLAIRE D'UNE MAISON PAR DALLE CHAUFFANTE

Il existe plusieurs types de chauffages qui permettent de faire des économies et de ne pas détruire la nature, parmi lesquels le chauffage solaire par dalle chauffante occupe une place très importante. Son principe de fonctionnement est relativement simple il consiste à capter l'énergie solaire avec des capteurs solaires thermiques et la communiquer sous forme de chaleur au fluide caloporteur qu'on va faire circuler par une pompe et transporter cette chaleur vers la dalle chauffante qui va jouer un double rôle (stockage et diffusion de la chaleur à travers la pièce à chauffer). Dans le cas d'insuffisance d'ensoleillement, on prévoit un chauffage d'appoint qui va communiquer au fluide caloporteur une chaleur additionnelle qui va palier au problème avec un régulateur de chaleur .

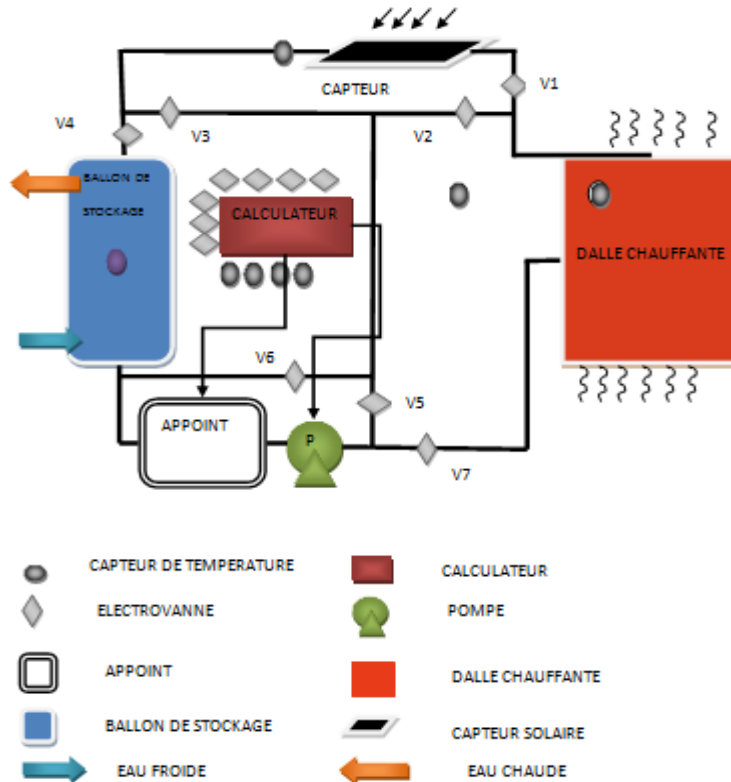


Fig. III.1: schéma de principe

III.3. DIFFERENTS TYPES DE CAPTEURS SOLAIRES THERMIQUES [13]

Les capteurs solaires thermiques sont des éléments essentiels pour les installations destinées à transformer l'énergie transmise par le soleil en chaleur. Le rayonnement solaire est absorbé par une surface noire, parcourue par un fluide caloporteur qui extrait l'énergie thermique et la transfère vers son lieu d'utilisation ou de stockage. La plupart des capteurs sont munis d'une couverture transparente qui laisse passer la plus grande partie du rayonnement solaire et évite le refroidissement de l'absorbeur. Les échanges par convection entre celui-ci et la couverture transparente sont réduits, de même que l'émission du rayonnement infrarouge de l'absorbeur.

C'est le principe de « l'effet de serre ». Une isolation thermique est disposée à l'arrière et sur la périphérie du capteur pour limiter les déperditions par conduction.

III.3.1. Capteur sans vitrage :

C'est le modèle le plus rustique et également le plus économique. Il est généralement constitué d'une simple plaque de métal ou de matière plastique (absorbeur) dans laquelle circule le liquide à réchauffer.

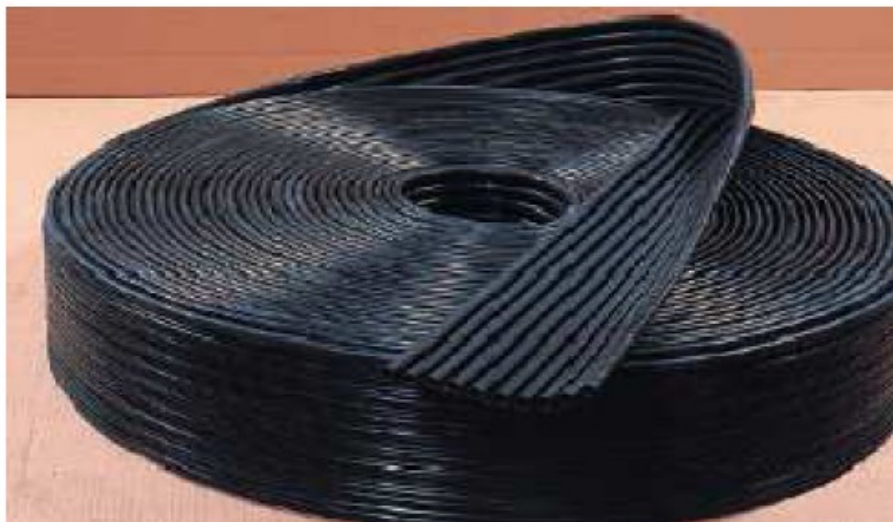


Fig. III.2: Capteur sans vitrage

Le principal domaine d'utilisation de ce capteur est le chauffage des piscines de plein air. Celles-ci sont le plus souvent utilisées en été, lorsque la température ambiante et le rayonnement solaire sont élevés. Dans ces conditions, l'efficacité des capteurs est très bonne.

Les capteurs sans vitrage peuvent également être utilisés pour des installations de production d'eau chaude sanitaire. C'est en particulier le cas dans des régions chaudes et fortement ensoleillée.

La parfaite intégration architecturale qu'autorise ce type de produit permet la mise en œuvre de surfaces plus importantes, pour compenser la différence d'efficacité avec des capteurs vitrés, en particulier l'hiver [13].



Fig. III.3: Installation de production d'eau chaude sanitaire

III .3.2.Capteurs vitrés : [13]

Les capteurs munis d'une couverture transparente, souvent appelés « capteurs vitrés », sont les plus utilisés, car ils correspondent au domaine d'application le plus courant: le chauffage de l'eau sanitaire et le chauffage d'une maison. La température d'utilisation est en général inférieure à 70°C.

Plus rarement, certains d'entre eux, munis d'une couverture transparente de type « double vitrage », permettent d'atteindre des températures de fonctionnement de l'ordre de 100°C, avec leurs température de fonctionnement élevée les « capteurs vitrés » sont efficaces pour les installations de chauffage solaire d'une maison par dalles chauffantes.

Le capteur vitré est constitué de différents composants :

- Le coffre ;
- L'isolation thermique ;
- L'absorbeur ;
- La couverture transparente ;
- Le fluide caloporteur.

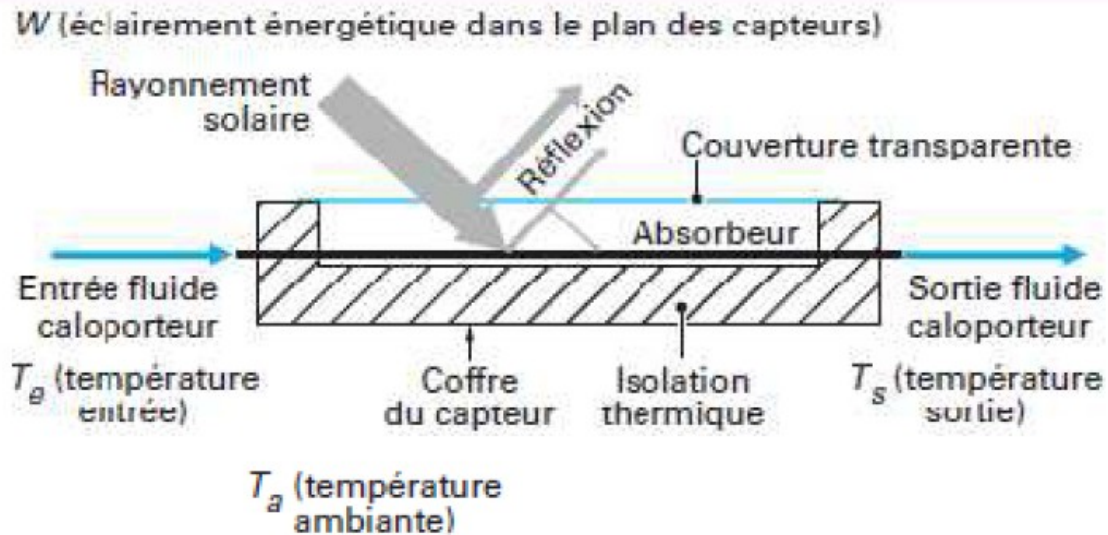


Fig. III.4: Coupe d'un capteur vitré [13]

III.3.2.1. Le Coffre :

Il assure la protection à l'arrière du capteur et participe à sa rigidité. On peut distinguer deux grands principes de construction :

- Les coffres monoblocs (par exemple en tôle pliée ou en matériaux composites) dont la géométrie assure la tenue mécanique de l'ensemble du capteur ;
- les ensembles constitués de profilés périphériques (souvent en aluminium) sur lesquels est fixée une protection (feuille de métal ou de matière plastique) qui assure l'étanchéité arrière.

Les matériaux les plus utilisés, pour constituer le fond du coffre, sont le métal (tôle d'acier ou d'aluminium) et les matières plastiques (ABS, poly (acrylonitrile-butadiène-styrène), polyester). Ils doivent présenter les caractéristiques suivantes : bonne tenue à la corrosion, faible prix de revient, transformation facile.

Les points de fixation des capteurs sur leurs supports font partie le plus souvent du coffre du capteur. Ces éléments doivent permettre la résistance aux efforts à l'arrachement induits par le vent [13].

III.3.2.2. Isolation thermique :

L'isolation thermique (arrière et latérale) évite les déperditions thermiques du capteur par conduction. Elle est constituée d'un matériau isolant qui, dans certains cas, participe à la tenue mécanique du capteur.

Dans un capteur solaire, l'isolation thermique est soumise à de très fortes contraintes. En effet, lorsque le capteur est exposé à un fort ensoleillement sans circulation de fluide caloporteur, l'absorbeur peut atteindre des températures très élevées, supérieures à 150°C . Ce phénomène, s'il se reproduit régulièrement, peut entraîner la destruction des isolants

courants tels que les mousses de polyuréthane. Le polystyrène expansé, dont la température limite d'utilisation est nettement inférieure à 100°C.

Dans tous les cas, il est préférable d'éviter un contact direct entre l'absorbeur et l'isolant.

Les seuls isolants résistants à ces températures sont les mousses phénoliques, peu courantes et chères, et les laines minérales (laine de verre et surtout laine de roche qui présente l'avantage de ne pas absorber l'humidité).

Les coefficients de conductivité λ et les déperditions pour une épaisseur d'isolant de 40 mm sont donnés dans le tableau I pour les matériaux isolants les plus utilisés [13].

Tableau III.1: Les coefficients de conductivité et la déperdition

| Matériaux | λ ($\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$) | Déperdition (W m^{-2}) |
|----------------------------|---|-----------------------------------|
| Mousse de polyuréthane | 0.030 | 0.75 |
| Laine de verre ou de roche | 0.040 | 1.00 |

III.3.2.3 Absorbeur : [13]

L'absorbeur est le composant qui permet de transformer le rayonnement solaire en chaleur et de transférer l'énergie thermique ainsi produite à un fluide caloporteur.

L'absorbeur est généralement constitué d'un réseau de tubes soudés ou fixés mécaniquement sur une plaque conductrice.

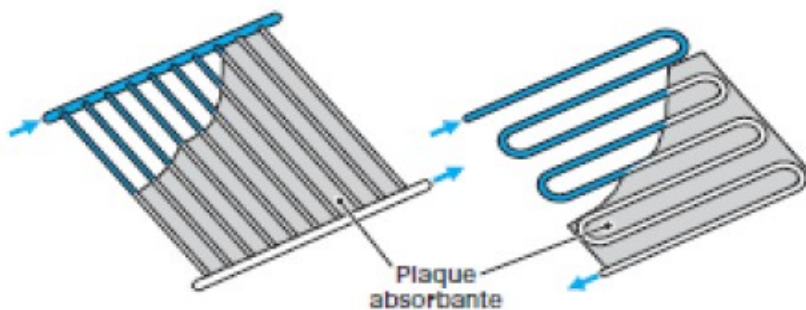


Fig. III.5: Absorbeurs sous forme d'échelle et de serpentin

Le matériau constituant la plaque de l'absorbeur peut être soit métallique, soit Plastique.

Dans le cas des métaux on utilise couramment le cuivre, l'aluminium ou bien l'acier inoxydable, l'emploi de matière plastique entraîne des différences notables mais il a des inconvénients énormes.

Le tableau III.2 représente les caractéristiques thermo-physiques de matériaux métalliques pouvant constituer la plaque de capteurs solaires plans :

Tableau III.2: Caractéristiques thermo-physiques de matériaux métalliques [1]

| Métal | Conductivité thermique λ (W/m K) | Chaleur massique C_p (J/kg K) | Masse volumique ρ (Kg/m ³) | Diffusivité $a = \frac{\lambda}{\rho C_p}$ (10 ⁻⁶ m/s) |
|------------------|--|---------------------------------|---|---|
| Cuivre | 384 | 398 | 8900 | 108 |
| Acier Inoxydable | 14 | 460 | 7800 | 4 |
| Aluminium | 204 | 879 | 2700 | 86 |

III.3.2.4. Couverture transparente :

Elle a la double fonction de laisser passer le maximum de rayonnement solaire et d'éviter le refroidissement de l'absorbeur, en réduisant les phénomènes de convection de l'air et en bloquant le rayonnement infrarouge (effet de serre).

Les matériaux les plus utilisés sont le verre trempé (pour réduire les risques d'accident en cas de bris).

Les matériaux de synthèse (polycarbonate, fluorure de polyvinyle), qui ont été utilisés dernièrement, ont presque complètement disparu pour des raisons de prix et de tenue au vieillissement.

Des travaux sont toujours en cours dans quelques centres de recherche, pour introduire à nouveau ce type de matériaux.

Le vitrage est fixé sur le coffre du capteur soit de façon mécanique (joint d'étanchéité et par close), soit collé directement sur le coffre.

C'est cette dernière solution qui est mise en œuvre sur les capteurs de conception récente.

La transmission énergétique correspond au pourcentage du flux d'énergie solaire transmis directement à travers le verre.

Une partie du rayonnement solaire est réfléchi par les parois du vitrage, tandis qu'une autre partie est absorbée par celui-ci, transformée en chaleur en entraînant une augmentation de sa température.

Le vitrage émet alors sur ses deux faces un rayonnement infrarouge. Le facteur solaire (ou transmission énergétique totale) représente la somme des transmissions optiques et infrarouges (fig. III.6).

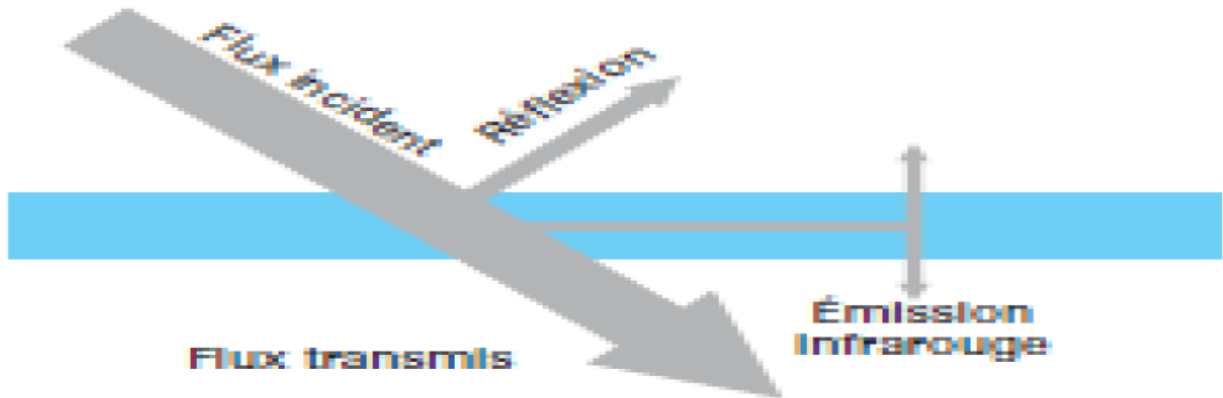


Fig. III.6: Facteurs énergétiques d'un vitrage

On notera également l'utilisation de vitrages à basse teneur en oxyde de fer, ces vitrages présentent des caractéristiques optiques légèrement supérieures aux vitrages standards.

Tableau III.3: caractéristiques énergétique des verres (épaisseur 4mm)

| Nature | Transmission énergétique % | Réflexion énergétique % | Absorption énergétique % | Facteur solaire % |
|--------------------------------------|----------------------------|-------------------------|--------------------------|-------------------|
| Verre claire | 83 | 8 | 9 | 85 |
| Verre à basse teneur en oxyde de fer | 90 | 8 | 2 | 90 |

Les valeurs indiquées dans le Tableau III.3 s'entendent pour des vitrages d'une épaisseur de 4mm qui sont le plus souvent utilisés.

III.3.2.5. Le fluide caloporteur : [1]

Pour évacuer la chaleur emmagasinée par la surface absorbante, on utilise habituellement soit l'air, soit l'eau.

Par rapport à l'eau, l'air a les avantages suivants:

- Pas de problème de gel l'hiver ou d'ébullition l'été lorsque le soleil "tape" fort,
- Avec de l'air sec, il n'y a pas de problème de corrosion,
- Toute fuite est sans conséquence,
- Il n'est pas nécessaire d'utiliser un échangeur de chaleur dans le cas du chauffage de locaux,
- Le système à mettre en œuvre est plus simple et plus fiable.

Mais son utilisation entraîne les inconvénients suivants :

- L'air ne peut servir qu'au chauffage des locaux,
- Le produit de la masse volumique ρ par la chaleur spécifique C_p est faible :

ρ . $C_p=1225\text{J/m}^3\cdot\text{K}$ pour l'air contre $4,2\cdot 10^6\text{ J/m}^3\cdot\text{K}$ pour l'eau.

- Les conduites doivent avoir une forte section pour laisser passer un débit suffisant compte tenu du point précédent.
- Les transferts thermiques sont moins bons qu'avec l'eau.

III.3.3. Capteur sous vide : [13]

Lorsque la température de fonctionnement du capteur est très élevée ($> 100^\circ\text{C}$) ou lorsque la température ambiante est faible (région de montagne), il est intéressant d'utiliser un capteur solaire dit « sous vide », qui se présente sous la forme de tubes de faible diamètre (jusqu'à une quinzaine de centimètres) dans lesquels sont disposés les absorbeurs, de conception identique à celle d'un capteur plan. L'intérieur du tube est vidé de l'air qu'il contient et des pertes par convection entre l'absorbeur et la paroi vitrée du tube sont ainsi supprimées. Le capteur sous vide voit ainsi ses déperditions limitées au rayonnement infrarouge. Pour limiter les effets de celui-ci, la surface de l'absorbeur possède un revêtement « sélectif ». (Fig. III.7 et .8).



Fig. III.7: Capteur sous vide

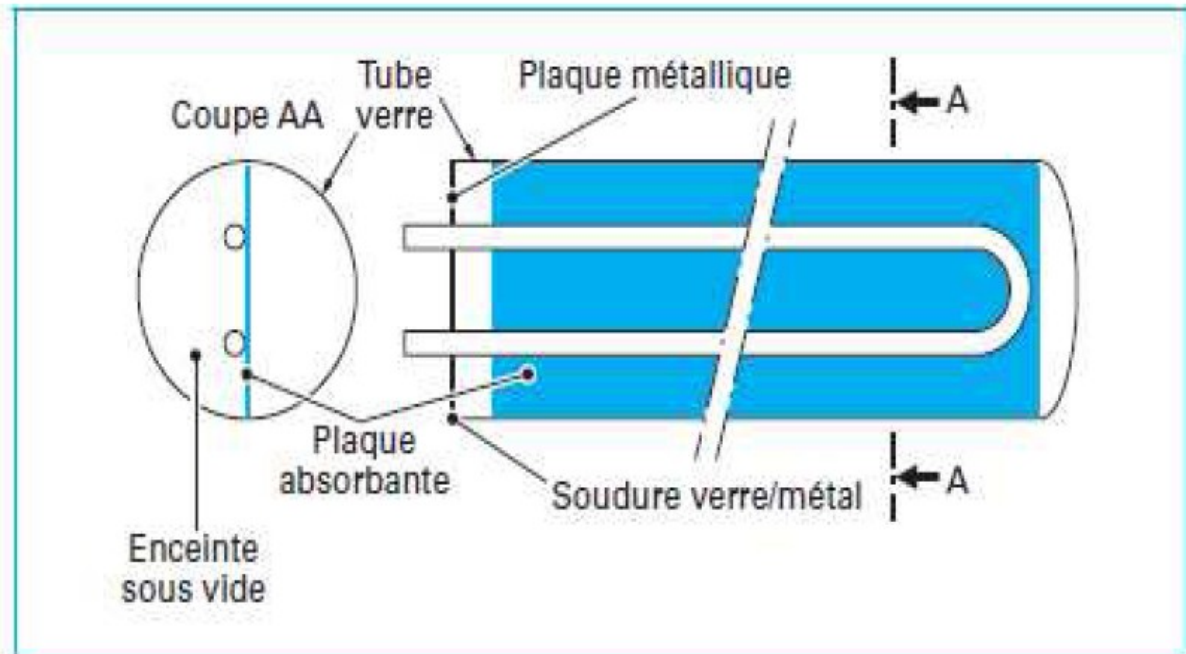


Fig. III.8: Coupe d'un capteur sous vide

III.3.4. Les capteurs à tube sous vide à effet thermos :

Ici, l'absorbant n'est pas dans le tube, mais glissé dans l'espace interne d'un tube double enveloppe en verre. Ainsi, la soudure verre-métal, toujours délicate, est évitée. Le tube intérieur comporte le revêtement sélectif. Ce type de capteur est majoritairement fabriqué et installé en Chine.



Fig. III.9: Schéma d'un capteur à tube sous vide à effet thermos [14]

III.3.5. Les capteurs-stockeurs :

Les capteurs stockeurs, comme leur nom l'indique, sont des ensembles qui cumulent les fonctions de captage et de stockage de l'énergie solaire. Le mur "Trombe" est une application connue de ce principe.

La fonction de stockage permet une autonomie de l'ordre de la journée et se fait dans des matériaux ayant une forte capacité thermique. Ces capteurs, souvent artisanaux, sont relativement peu répandus et servent principalement pour la production d'eau chaude sanitaire ou le chauffage des maisons (mur Trombe). On trouve également certains capteurs qui fonctionnent comme un plancher chauffant "à l'envers" : une dalle en béton capte et accumule l'énergie solaire et la restitue à un fluide caloporteur circulant dans des tubes noyés dans le béton.

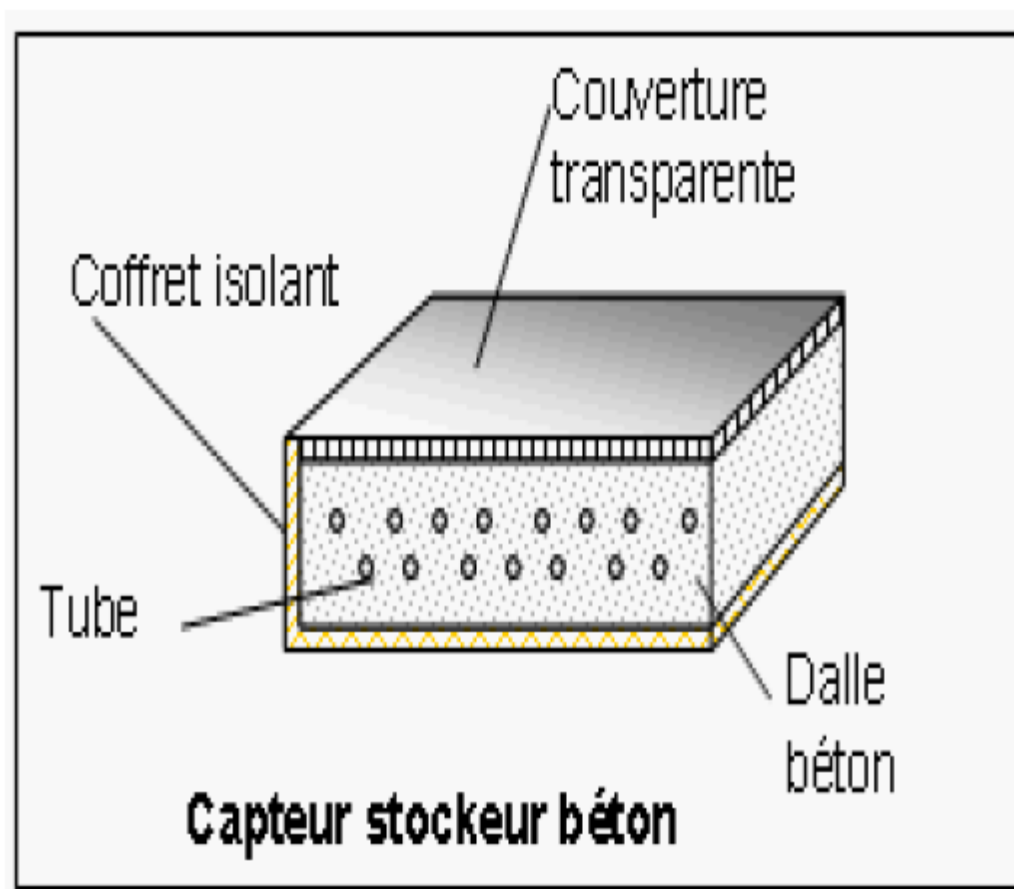


Fig. III.10: capteurs stockeurs

III.3.6. Les capteurs plans vitrés : [1]

Les capteurs plans vitrés sont les éléments fondamentaux de la transformation de l'énergie solaire en énergie thermique à basse température. Sans concentration du rayonnement solaire, le flux d'énergie tombant sur une surface située au niveau de la mer ne peut guère dépasser 1KW/m^2 . Cette valeur ne permet pas d'atteindre des températures supérieures à

100°C. Ces capteurs plans sont principalement utilisés pour la production de l'eau chaude sanitaire, le chauffage des habitations, le séchage...etc. (Figure. I.3)

III.3.6.1. Bilan thermique d'un capteur plan : [1]

Le bilan thermique d'un capteur traduit la relation entre le flux absorbé et le flux emmagasiné tenant compte des pertes par convection et rayonnement. On écrit :

$$\Phi = \Phi_u + \Phi_a + \Phi_t \quad (\text{III.1})$$

Φ : énergie absorbée par le capteur (W).

Φ_u : énergie emmagasinée dans le fluide caloporteur (énergie utile).

Φ_a : énergie perdue vers l'extérieur par convection et rayonnement.

Φ_t : énergie de démarrage nécessaire à la montée de température du capteur.

III.3.6.2. Rendement du capteur plan : [15]

Le rendement d'un capteur solaire dépend de :

- la température d'entrée et de sortie du fluide caloporteur,
- le flux solaire incident,
- les données climatiques propres au site (température et vitesse du vent),
- les caractéristiques géométriques et les propriétés physiques des éléments le constituant.

Sa formule est donnée comme suit :

$$\eta = \eta_o - \frac{K}{G} (T_p - T_a) \quad (\text{III.2})$$

Avec :

η_o : rendement optique du capteur ;

K: coefficient de transmission surfacique en $W/m^2 \text{ } ^\circ C$;

G: éclairement solaire en W/m^2 ;

T_p : Température de la paroi ;

T_a : Température de l'air.

➤ Influence de la température de l'absorbeur sur le rendement du capteur [1]

Le ciel rayonne à la température T_∞ est donnée par la formule empirique suivante:

$$T_\infty = 0,0552 T_a^{1,5}$$

Où T_{∞} et T_a sont exprimés en degrés Kelvin.

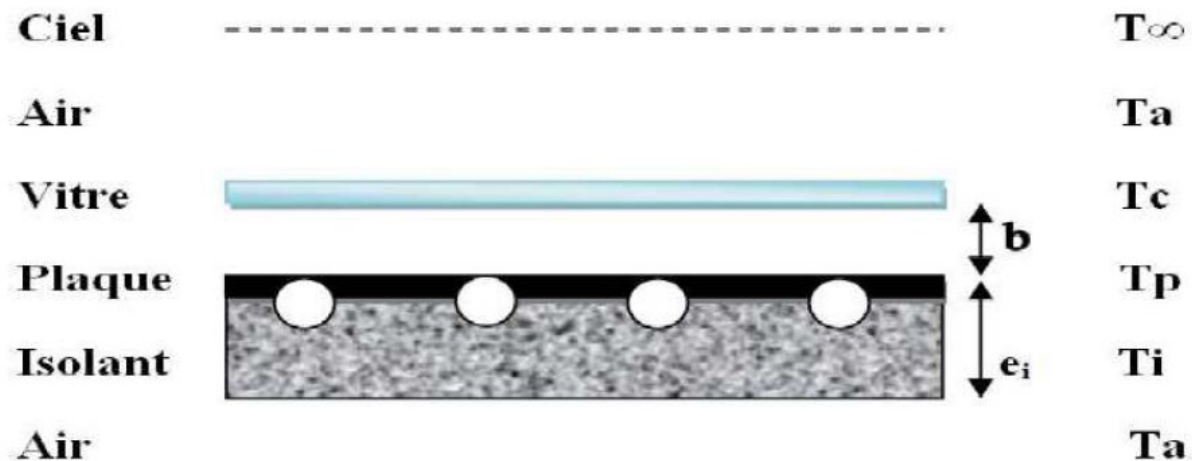


Fig. III.11: schéma donnant les températures des différents éléments intervenants dans la détermination du rendement d'un capteur plan [1]

En première approximation on écrit l'expression de la puissance solaire absorbée par le capteur :

$$\Phi = G * \tau_c * \alpha_p \quad (\text{III.3})$$

En négligeant l'énergie solaire absorbée par la vitre, en toute rigueur, elle n'est pas nulle puisque l'on peut écrire :

$$\rho_c + \tau_c + \alpha_p = 1 \quad (\text{III.4})$$

τ_c : coefficient de transmission solaire de la couverture transparente, il est différent selon que l'on s'intéresse au flux solaire directe ou diffus.

α_p : coefficient d'absorption solaire de la plaque absorbante.

ρ_c : coefficient de réflexion de la plaque absorbante.

Cette relation entre ces différents coefficients signifie que le rayonnement tombant sur la vitre est soit réfléchi (ρ_c), soit absorbé (α_p), soit transmis (τ_c). [1]

III.3.6.3. Influence de la température d'entrée de fluide caloporteur : [1]

Il paraît plus judicieux de chercher à déterminer le rendement du capteur en fonction non pas de la température T_p de l'absorbeur, mais plutôt en fonction de la température T_{fe} de fluide à l'entrée du capteur. Au début on a considéré la surface absorbante isotherme à T_p . En réalité la plaque est soumise à un champ de température non uniforme, constant en régime permanent.

On définit le nombre de tuyauteries n_t comme suit :

$$n_t = l/p \quad \text{(III.5)}$$

l : largeur de la surface absorbante (m).

p : le pas de tuyauteries (m).

On définit le débit massique par tuyauterie \dot{m} (kg/s) comme suit :

$$\dot{m} = \rho * V / n_t \quad \text{(III.6)}$$

ρ : masse volumique du fluide caloporteur (kg/m³).

V : débit volumique de fluide dans la tuyauterie (m³/s).

On définit le débit massique par unité de surface de capteur \dot{M} (kg/s.m²)

$$\dot{M} = \dot{m} / p * L \quad \text{(III.7)}$$

L : est la longueur de la surface absorbante (m). D'où la puissance fournie au fluide par mètre carré s'écrit :

$$\Phi_u = \dot{M} * C_p * (T_{fe} - T_{fs}) \quad \text{(III.8)}$$

C_p : est la chaleur massique de fluide caloporteur (j/kg.K).

T_{fe} et T_{fs} : température d'entrée et de sortie de fluide dans le capteur.

III.3.6.4. Courbe de rendement des capteurs plans :

La courbe (Fig.III.12) représente les rendements des capteurs à tubes sous-vide, plan vitré et non vitré :

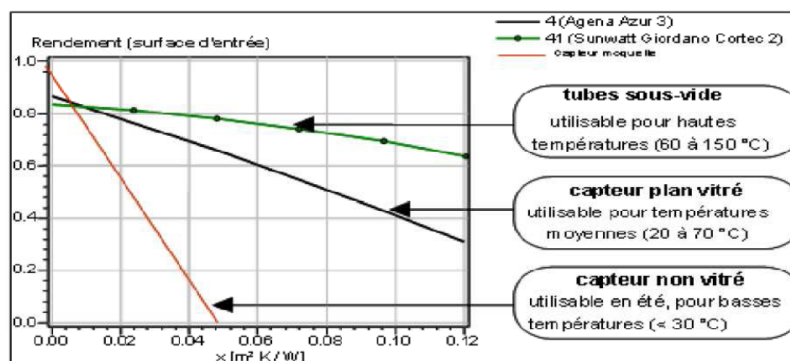


Fig. III.12: courbe de rendement des capteurs plans [14]

III.4.LES TYPE DES POMPES UTILISEES [16]

Les pompes véhiculant des liquides se divisent en deux catégories principales:

- ❖ les pompes centrifuges : le mouvement du liquide résulte de l'accroissement d'énergie qui lui est communiqué par la force centrifuge.
- ❖ les pompes volumétriques : l'écoulement résulte de la variation d'une capacité occupée par le liquide.

Dans le cas du chauffage utilisant un liquide caloporteur pour le transfert de la chaleur l'utilisation d'une **pompe centrifuge** pour forcer l'écoulement sera le choix le plus judicieux à cause de la viscosité du caloporteur et le cout relativement faible de ces pompes.

III.4.1.Les pompes centrifuges : [16]

III.4.1.1.Principe de fonctionnement :

Une pompe centrifuge est constituée par:

Une roue à aubes tournant autour de son axe

- un distributeur dans l'axe de la roue
- un collecteur de section croissante, en forme de spirale appelée volute.

Le liquide arrive dans l'axe de l'appareil par le distributeur et la force centrifuge le projette vers l'extérieur de la turbine. Il acquiert une grande énergie cinétique qui se transforme en énergie de pression dans le collecteur où la section est croissante.

L'utilisation d'un diffuseur (roue à aubes fixe) à la périphérie de la roue mobile permet une diminution de la perte d'énergie [16].

III.4.1.2.Amorçage :

Les pompes centrifuges ne peuvent s'amorcer seules.

L'air contenu nécessite d'être préalablement chassé. On peut utiliser un réservoir annexe placé en charge sur la pompe pour réaliser cet amorçage par gravité.

Pour éviter de désamorcer la pompe à chaque redémarrage il peut être intéressant d'utiliser un clapet anti-retour au pied de la canalisation d'aspiration [16].

III.4.1.3.Caractéristiques :

Les hauteurs manométriques totales fournies ne peuvent dépasser quelques dizaines de mètres. Pour dépasser ces valeurs on utilise des pompes centrifuges multicellulaires où plusieurs roues sont montées en série sur le même arbre.

Le refoulement d'une des pompes communique avec l'aspiration de la pompe suivante. Il est également possible de coupler en série plusieurs de ces pompes.

Le rendement est de l'ordre de 60 à 70 %: il est inférieur à celui des pompes volumétriques.

Les pompes centrifuges vérifient des lois (lois de similitude) qui à partir d'une courbe caractéristique établie pour une vitesse de rotation N de la roue de la pompe permettent d'obtenir la caractéristique pour une vitesse de rotation N' quelconque.

Si on connaît pour une vitesse N , le débit Q_{vN} , la hauteur manométrique totale

H_{tN} et la puissance absorbée P_N , on sait qu'il existe deux courbes caractéristiques

(H_t en fonction de Q_v et P en fonction de Q_v) pour la vitesse N' tels que les points

définis par les coordonnées $(Q_{vN'}, H_{tN'})$ et $(Q_{vN'}, P_{N'})$ en soient respectivement éléments.

Les lois de similitude permettent de déterminer $Q_{vN'}$, $H_{tN'}$ et $P_{N'}$: [16]

$$Q_{vN'} = Q_{vN} * \frac{N'}{N} \quad \text{(III.9)}$$

$$H_{tN'} = H_{tN} * \left(\frac{N'}{N}\right)^2 \quad \text{(III.10)}$$

$$P_{N'} = P_N * \left(\frac{N'}{N}\right)^3 \quad \text{(III.11)}$$

On peut ainsi reconstruire point par point les caractéristiques pour la vitesse de rotation n' en prenant des points différents des caractéristiques établies pour la vitesse N .

III.4.1.4.Utilisation : [16]

Ce sont les pompes les plus utilisées dans le domaine industriel à cause de la large gamme d'utilisation qu'elles peuvent couvrir, de leur simplicité et de leur faible coût.

Néanmoins, il existe des applications pour lesquelles elles ne conviennent pas:

- utilisation de liquides visqueux: la pompe centrifuge nécessaire serait énorme par rapport aux débits possibles.
- utilisation de liquides "susceptibles" c'est-à-dire ne supportant pas la très forte agitation dans la pompe (liquides alimentaires tels que le vin, le lait et la bière).
- utilisation comme pompe doseuse: la nécessité de réaliser des dosages précis instantanés risque d'entraîner la pompe en dehors de ses caractéristiques optimales.

Ces types d'application nécessitent l'utilisation de pompes volumétriques. Par contre contrairement à la plupart des pompes volumétriques, les pompes centrifuges admettent les suspensions chargées de solides.

III.5.LE CHAUFFAGE D'APPOINT

Le chauffage solaire a lui tout seul ne peut pas assurer le chauffage d'une maison par dalle chauffante dans les jours non ensoleillés et très froids c'est pour cette raison qu'on a besoin d'installer un deuxième système de chauffage pour compenser la différence dans de tels jours.

III.5.1.Les différents dispositifs de chauffage d'appoint :

- Le chauffage au gaz (gaz naturel; propane)
- Le chauffage par pompe à chaleur
- Le chauffage au fioul
- Le chauffage par résistance électrique

On va s'intéresser au chauffage le plus économique à savoir le chauffage par pompe à chaleur et au gaz:

III.5.1.1. La pompe à chaleur (PAC) : [17]

La **pompe à chaleur (PAC)** est un dispositif de transfert de chaleur à l'aide d'un **fluide frigorigène** dont la propriété principale est, à basse pression (à l'état gazeux), de capter la chaleur du milieu où il se trouve, puis de restituer cette chaleur dès qu'on le comprime. Une pompe à chaleur fonctionne schématiquement de la façon suivante (fig. II.19.20) :

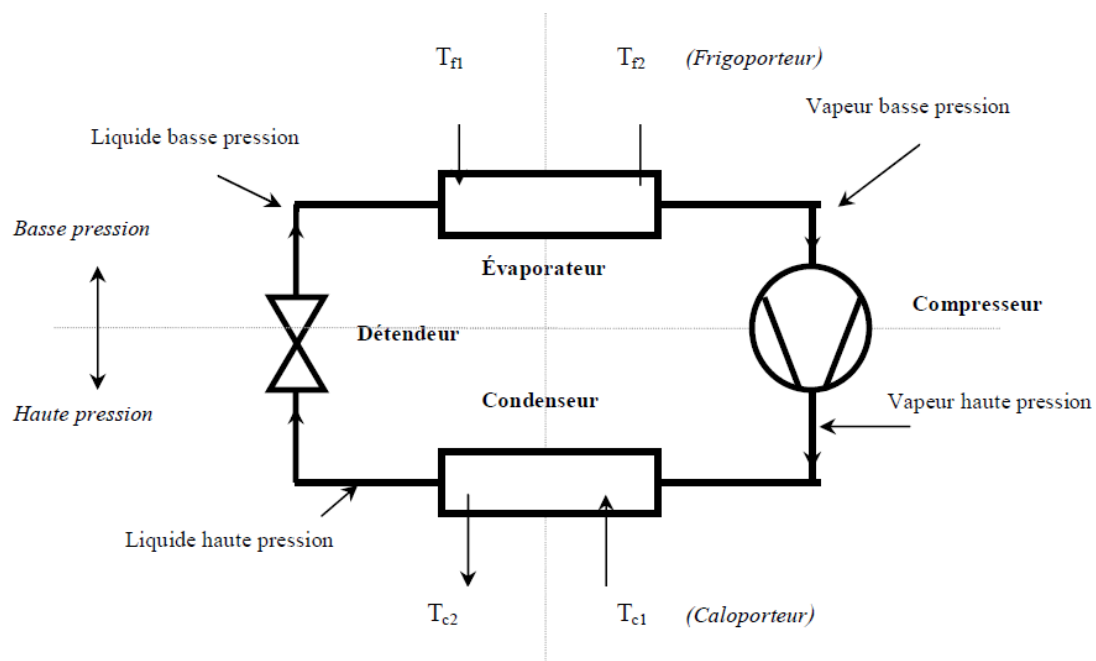


Fig. III.13: Schéma de principe de la pompe à chaleur à compression de vapeur [17]

Le cycle fondamental d'une telle machine (à *compression mono-étagée*) peut être décomposé en quatre étapes illustrées dans un diagramme enthalpique ($\text{Log } P = g(h)$).

- Le compresseur comprime le fluide (gaz R407C) qui, sous, l'effet de l'augmentation de la pression, s'échauffe en arrivant dans le **condenseur**.
- La haute pression liquéfie le gaz qui cède les calories qu'il contient.
- Le gaz liquéfié quitte le condenseur puis traverse un détendeur qui abaisse sa pression.
- La basse pression gazéifie le fluide qui refroidit.
- Le fluide traverse l'**évaporateur** où il absorbe les calories de l'air ambiant puis rejoint le compresseur et le cycle recommence.

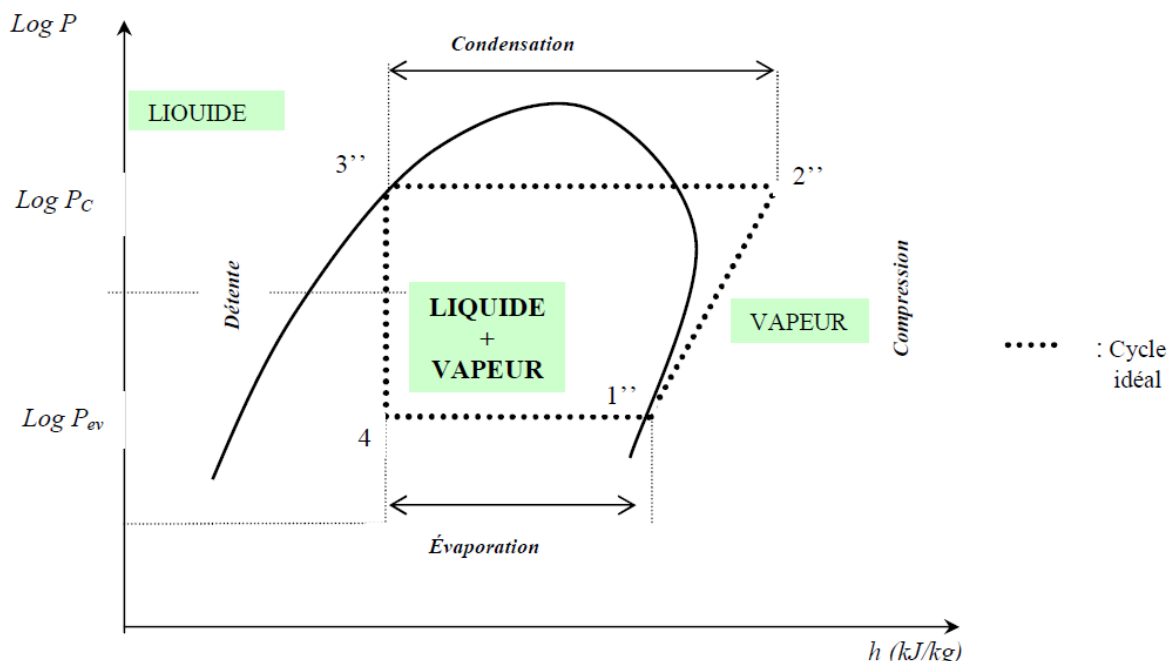


Fig. III.14 : Cycle frigorifique idéal [17]

Les étapes de transformation sont ainsi:[17]

- 1''- 2'' : compression adiabatique réversible (isentropique) : au point 1'', le liquide est entièrement vaporisé.

2''-3'' : condensation isotherme et isobare : il y a liquéfaction. La différence d'enthalpie entre 2'' et 3'' représente la quantité de chaleur laissée au condenseur (donc fournie Le choix d'échelle en abscisse (enthalpie h en kJ / Kg) est très pratique pour l'exploitation quantitative du cycle, car il permet de lire directement les énergies h_i aux différents points (1'',2'',3'',4'') du cycle de la machine.

- au caloporteur).
- 3''- 4'' : détente isenthalpique du liquide frigorigène au travers d'une vanne de laminage. L'enthalpie ne varie pas car le froid produit sert pratiquement à refroidir le fluide.
- 4''-1'' : évaporation isotherme et isobareet le cycle recommence.

Ce cycle fondamental s'accompagne des hypothèses suivantes d'une machine supposée idéale : le compresseur est parfait (pas d'espace mort, parois imperméables, pas de frottements ni de résistance passive).

Les échanges de chaleur dans l'évaporateur et dans le condenseur se font d'une manière réversible.

Les parois des tuyauteries sont imperméables à la chaleur et l'écoulement du fluide s'y effectue sans frottement ni résistance passive.

En se rapportant toujours au diagramme enthalpique (Log P, h) de la figure 1.11 il est possible d'établir les valeurs théoriques des paramètres caractérisant le cycle idéal.

Ce diagramme (appelé aussi « diagramme de Mollier ») est rapporté à une masse de fluide frigorigène $m = 1$ kg.

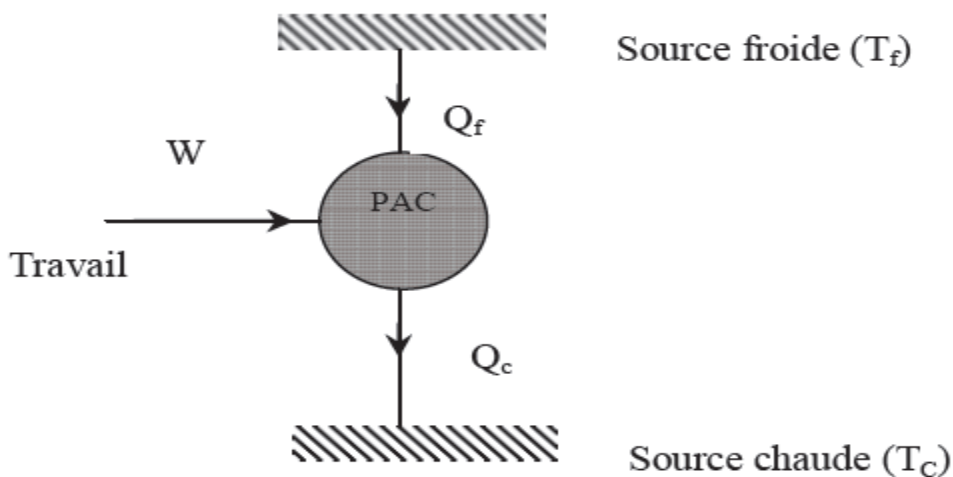


Fig. II.15: Schématisation du transfert de chaleur [17]

III.5.1.2. Chauffage à Gaz :

Le chauffage à gaz est un système de chauffage qui utilise une chaudière pour brûler du gaz de ville et ainsi récupérer l'énergie thermique issue du processus de combustion de ce gaz et il utilise aussi une pompe de circulation pour transférer la chaleur produite vers le ballon de stockage ou le circuit de chauffage directement, ces dernières années on a vu une multitude de chaudières qui sont conçus de façon à augmenter le rendement, réduire les émissions de NOx et de CO₂ comme les chaudières à ventouses ou les chaudières à accumulation.



Fig. III.16 : chaudière à ventouse [18]

➤ **Description du fonctionnement de la chaudière à gaz**

La chaudière à gaz s'allume par une étincelle produite par un allumeur piézoélectrique pour allumer la bougie en actionnant la vanne qui va faire passer le gaz qui s'enflammera au contact de l'air et de l'étincelle ensuite tout en gardant la vanne de la bougie ouverte on actionne la vanne du bruleur qui va faire passer le gaz et s'enflamme au contact de l'air et de la flamme de la bougie et le bruleur s'allume, des dispositifs de régulation sont envisagés leur fonction est de rendre l'ouverture de la vanne de bruleur en fonction de la température désirée.

III.6.LES CONDUITES

III.6.1. Perte de charge dans les conduits :

III.6.1.a. Les Pertes de Charge Linéaires ou Réparties :

➤ **Notion de Rugosité des Conduites**

Contrairement à une surface lisse, une surface rugueuse implique un état de surface dont les irrégularités ont une action directe sur les forces de *frottements*.

Une surface rugueuse peut être considérée comme étant constituée par une série de protubérances élémentaires caractérisées par une hauteur, notée k , et appelée " **Rugosité** " [19].

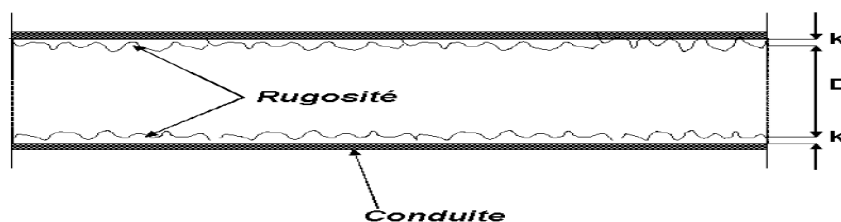


Fig. III.17: schéma du Rugosité dans la conduite [19]

Afin de comparer la rugosité par rapport au diamètre de la conduite, on introduit le rapport : [19]

$$\varepsilon = \frac{k}{D} : \text{rugosité relative} \quad (\text{III.23})$$

➤ **Expression de la perte de charge due aux frottements**

La perte de charge linéaire est calculée par la formule de Darcy – Weisbach (1857) :

Calcul du nombre de Reynolds R_e : [19]

$$R_e = 1000 * \frac{u * D}{\nu} \quad (\text{III.24})$$

u : vitesse de l'écoulement en (m/s) ;

D : diamètre interne du tuyau en (mm) ;

ν : viscosité cinématique de l'eau (mm^2/s).

$$h_r = \lambda * \frac{L}{D} * \frac{u^2}{2g} : \text{Formule de Darcy – Weisbach (1857)} \quad (\text{III.25})$$

Avec :

- D = Diamètre de la section d'écoulement (m) ;
- L = Longueur de la conduite (m) ;
- u = Vitesse d'écoulement (m/s) ;
- λ = Coefficient de frottement (sans unité).

Plusieurs formules sont proposées pour le calcul de λ et dépendent du régime d'écoulement: [20]

➤ **Perte de charge en régime laminaire**

$$Re < 2000 \Rightarrow \lambda = \frac{64}{R_e} \quad (\text{III.26})$$

➤ **Perte de charge en régime turbulent**

$$Re > 2000$$

Plusieurs formules de calcul du coefficient λ sont proposées par différents auteurs : [19]

- Formule de *Colebrook – White* :

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = -2 \text{Log} \left[\underbrace{\left(\frac{k}{3.71 D} \right)}_{\text{Effet de la rugosité de la conduite}} + \underbrace{\left(\frac{2.51}{Re \sqrt{\lambda}} \right)}_{\text{Effet de viscosité du fluide}} \right] \quad (\text{III.27})$$

Effet de la rugosité de la conduite Effet de viscosité du fluide

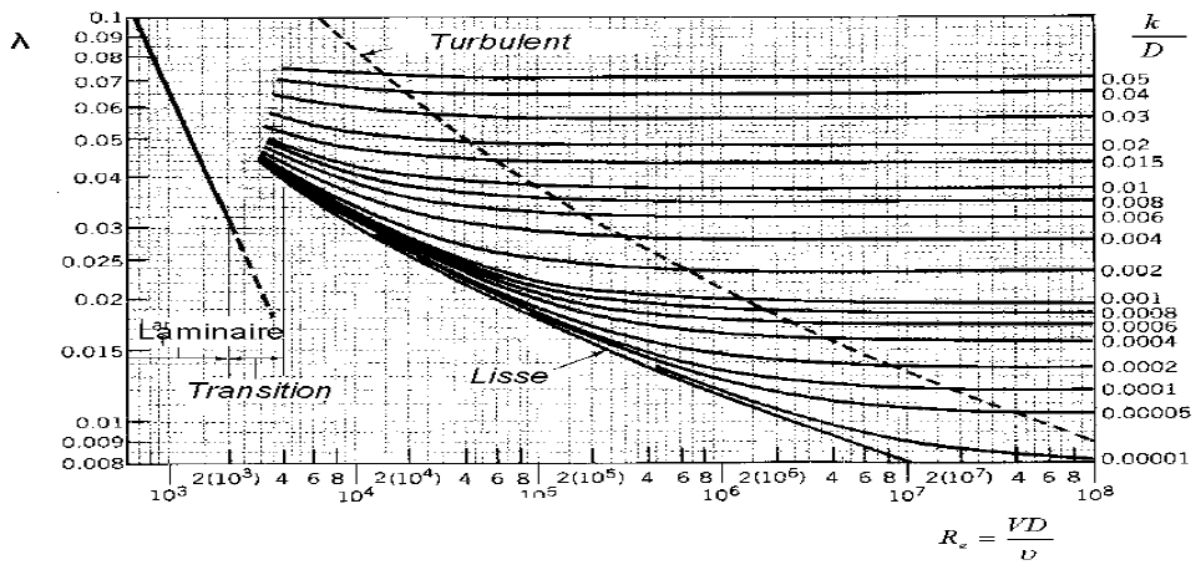


Fig. III.18: Diagramme de Moody [19]

III.6.1.b. Les Pertes de Charge Locales ou Singulières :

➤ Expression Générale d'une Perte de Charge Singulière

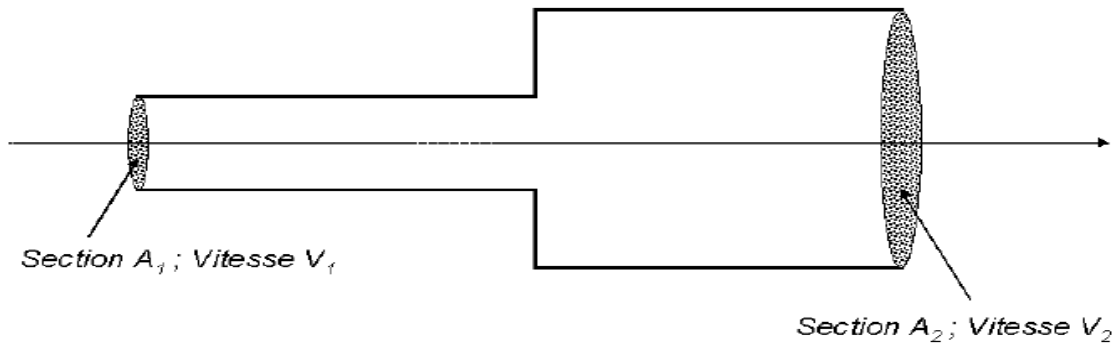
En plus de pertes de charge linéaires, la perte de charge singulière se produit localement au niveau d'une modification brusque de la nature physique de la section d'écoulement. Elle se calcule par la formule générale suivante : [19]

$$h_s = \zeta_s \frac{u^2}{2g} \quad (\text{III.28})$$

Avec :

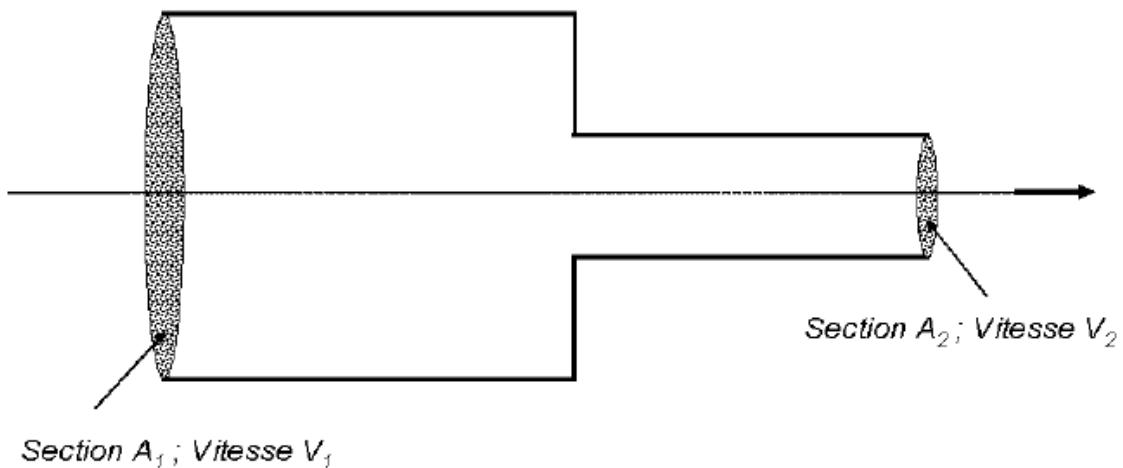
ζ_s = Coefficient qui dépend de la nature de la déformation.

➤ Cas d'un élargissement brusque de la section d'écoulement

Elargissement brusque de la section**Fig. III.19: Elargissement brusque de la section [19]**

$$\zeta_{\text{seb}} = \left(1 - \frac{A_1}{A_2}\right)^2 \rightarrow h_{\text{seb}} = \left(1 - \frac{A_1}{A_2}\right)^2 * \frac{u_1^2}{2g} \quad \text{(III.29)}$$

➤ Cas d'un rétrécissement brusque de la section d'écoulement

Rétrécissement brusque de la section**Fig. III.20: Rétrécissement brusque de la section [19]**

La formule de calcul s'écrit :

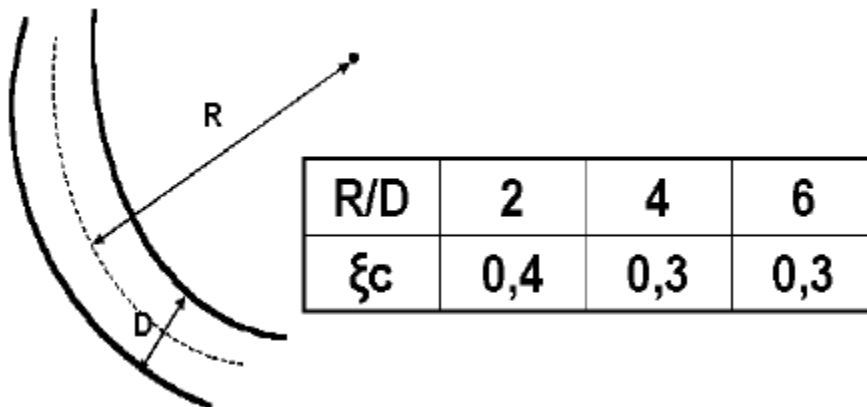
$$h_{\text{srb}} = \zeta_{\text{rb}} \frac{u^2}{2g} \quad \text{(III.30)}$$

Avec :

ζ_{rb} = Coefficient due au rétrécissement brusque donné par le tableau suivant :

Tableau III.4: Coefficient de perte de charge singulière due au rétrécissement [19]

| | | | |
|--------------|------|------|------|
| A1/A2 | 0,1 | 0,5 | 0,7 |
| ζ_{rb} | 0,41 | 0,24 | 0,14 |

➤ **Cas d'un coude :****Tableau III.5: coefficient de perte pour le cas d'un coude****III.7.PLANCHER CHAUFFANT [21]**

Il existe deux types de planchers chauffants :

- le plancher chauffant relié a un système de chauffage centralisé véhiculant un fluide caloporteur, système qui peut être réversible.
- le plancher chauffant électrique fonctionnant avec un câble électrique qui se comporte comme une résistance placée sous le plancher.

II.7.1.Système de chauffage par le sol à eau chaude :

Un plancher chauffant est un système de chauffage par le sol ou les tubes transportant de l'eau avec ou sans additif comme fluide chauffant sont noyés dans le plancher.

Une installation de chauffage par le sol comprend un plancher chauffant, des distributeurs et des équipements de régulation [21].

Un plancher chauffant est composé de :

- une couche d'isolation thermique et phonique ;
- une couche de protection de la couche d'isolation ;
- des tubes de chauffage ou des sections planes ;
- Une couche de répartition et d'émission thermique (dalle) ;
- un revêtement de sol.

Le support, quelle que soit sa nature, béton ou autres matériaux, n'est pas inclus dans le complexe « plancher chauffant ».

On distingue les panneaux chauffants en fonction du système porteur des planchers et de leur association avec ces planchers. Ainsi la réglementation distingue deux types de complexes de planchers chauffants à eau chaude : [21]

- les planchers chauffants à eau chaude en dalle désolidarisée isolée.
- les planchers chauffants à eau chaude en autres dalles que les dalles désolidarisées isolées.

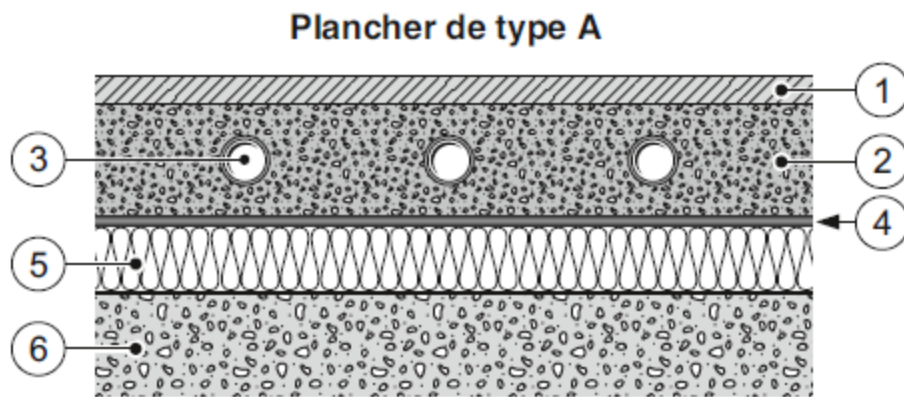
On donne les principales définitions suivantes :

- dalle désolidarisée : dalle d'épaisseur uniforme, rendue indépendante du plancher support et des murs par l'interposition de matériaux de faible épaisseur ;
- dalle pleine : le plancher est constitué par une dalle pleine en béton armé d'épaisseur uniforme ; cette dalle peut être coulée en une seule fois ou en deux fois lorsqu'il s'agit d'un système de pré-dalle ;
- plancher à dalles alvéolées : plancher constitué à partir d'éléments préfabriqués (dalles alvéolées) en béton précontraint
- on appelle dalle collaborante rapportée une dalle en béton armé entièrement coulée en œuvre sur la surface des dalles alvéolées ;
- plancher nervure : plancher constitué de poutrelles et d'entrevous (béton, polystyrène, terre cuite, etc.) Reçevant une dalle de compression qui constitue la membrure supérieure comprimée du plancher ;
- pré-dalle : plaque préfabriquée en béton armé ou précontraint destinées à former la partie inférieure armée d'un plancher.

L'épaisseur du béton de complément coulé en œuvre est au moins égale à celle de la pré-dalle.

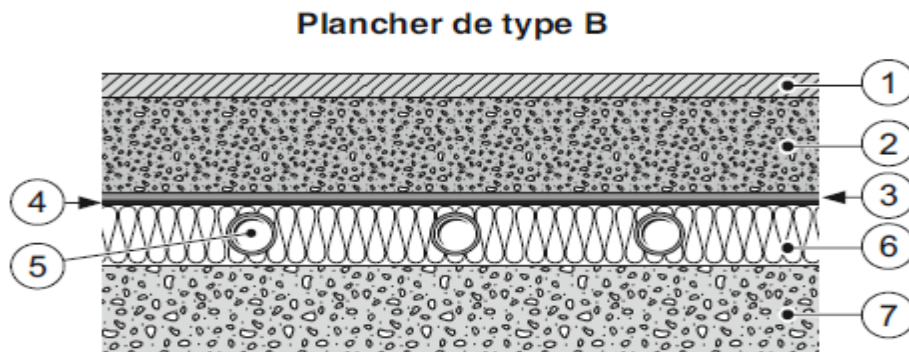
Il existe trois types de structures de plancher chauffant :

- avec tubes dans la dalle de type A et C : les tubes chauffants sont totalement ou partiellement noyés dans la dalle ;
- avec tubes sous la dalle type B: les tubes chauffants sont placés dans la couche d'isolant thermique sous la dalle ;
- avec sections planes : c'est un système avec circulation parallèle ou croisée dans une section creuse installée sur toute la surface.



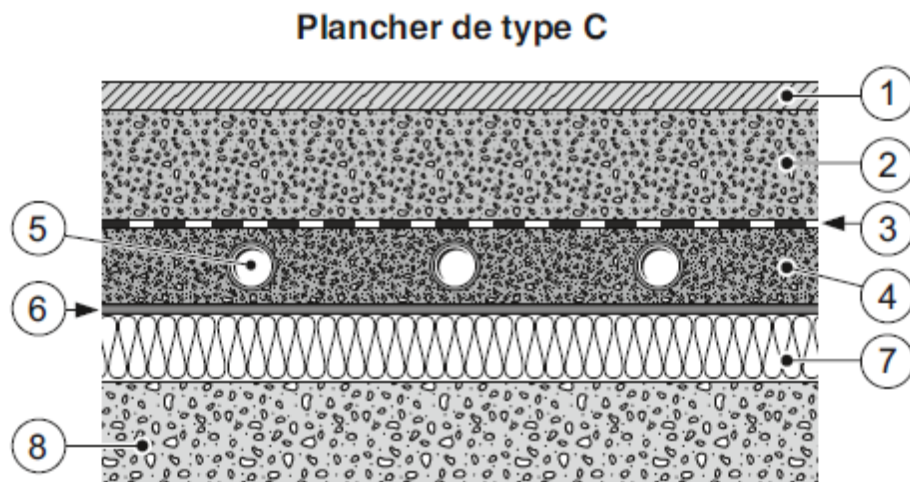
| <i>Termes utilisés dans la norme NF EN 1264-1</i> | <i>Termes utilisés en France</i> |
|---|--------------------------------------|
| 1 - Revêtement de sol | 1 - Revêtement de sol |
| 2 - Dalle | 2 - Couche d'enrobage |
| 3 - Tube chauffant | 3 - Tube chauffant |
| 4 - Couche de protection | 4 - Couche de protection |
| 5 - Couche d'isolation | 5 - Sous-couche d'isolation plane |
| 6 - Plancher porteur | 6 - Support |

Fig. III.21: Plancher de type A [21]



| <i>Termes utilisés dans la norme NF EN 1264-1</i> | <i>Termes utilisés en France</i> |
|---|--------------------------------------|
| 1 - Revêtement de sol | 1 - Revêtement de sol |
| 2 - Dalle | 2 - Couche d'enrobage |
| 3 - Couche de protection | 3 - Couche de protection |
| 4 - Diffuseur | 4 - Diffuseur |
| 5 - Tube chauffant | 5 - Tube chauffant |
| 6 - Couche d'isolation | 6 - Sous-couche d'isolation plane |
| 7 - Plancher porteur | 7 - Support |

Fig. III.22: plancher de type B [21]



*Termes utilisés dans la norme
NF EN 1264-1*

- 1 - Revêtement de sol
- 2 - Dalle
- 3- Couche de séparation
- 4 - Couche de nivellement
- 5 - Tube chauffant
- 6 - Couche de protection
- 7 - Couche d'isolation
- 8 - Plancher porteur

Termes utilisés en France

- 1 - Revêtement de sol
- 2 - Couche désolidarisée
- 3 - Double couche de désolidarisation
- 4 - Couche d'enrobage
- 5 - Tube chauffant
- 6 - Couche de protection
- 7 - Sous-couche d'isolation plane
- 8 - Support

Fig. III.23: plancher de type C [21]

III.8.BALLON DE STOCKAGE

On plus des stockages de chaleur qu'offre la dalle chauffante on peut prévoir un deuxième système de stockage pour augmenter la capacité de l'installation à stocker de la chaleur ,on remarque que pour stocker la chaleur on a besoin d'utiliser une substance qui possède une chaleur spécifique élevée et on remarque que l'eau remplit cette condition donc l'utilisation d'un ballon de stockage calorifugé remplie d'eau est une solution très pratique vue que l'eau est utilisée comme fluide caloporteur on peut directement utiliser cette eau ou ajouter un antigel si la température extérieur est trop basse.

III.8.1.Principe de fonctionnement :

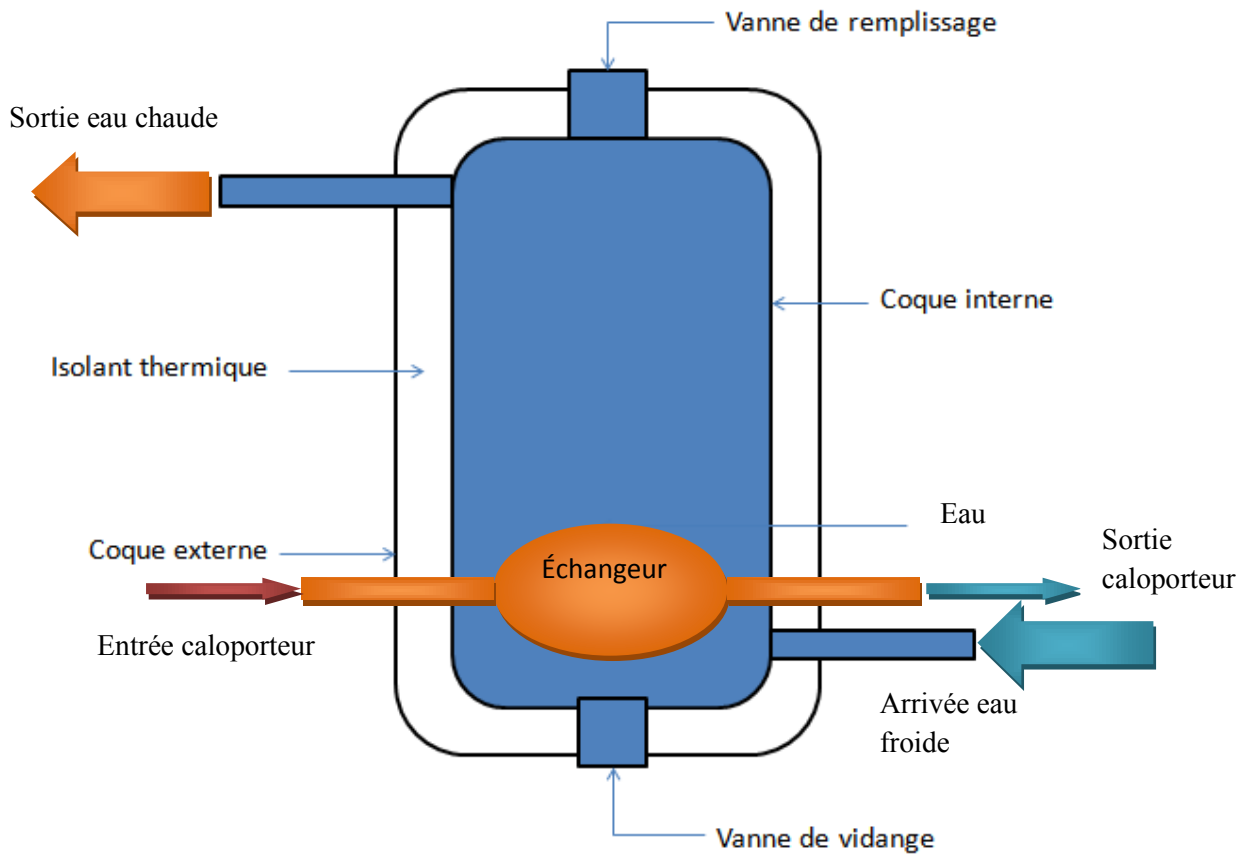


Fig.III.24 : Schéma de principe d'un ballon de stockage de chaleur

Le ballon de stockage de chaleur possède un échangeur dans le quelle entre le fluide caloporteur chaud et sort froid il est composé aussi d'une vanne de vidange dans le cas ou on veut changer l'eau stockée dans le ballon ou simplement on veut enlever les saletés de ce dernier et d'une vanne de remplissage dans le cas ou on veut remplir le ballon de stockage avec de l'eau.

Il est aussi composé d'une coque externe qui le protège des éventuels chocs et d'une coque interne qui contiens l'eau séparées par un isolant thermique et ce dernier a un rapport direct avec le temps de stockage à chaque fois que l'isolant thermique est meilleur on aura un temps de stockage long et pour un isolant thermique de mauvaise qualité les déperditions de chaleur vont augmentés et par conséquence on aura un temps de stockage réduit.

III.8.2.Performance du ballon de stockage :

Capacité de stockage de la chaleur C_s qui est donnée comme suit :

$$C_s = m * c_p * \Delta T = \rho * V * c_p * \Delta T \quad (\text{III.31})$$

m : La masse du caloporteur contenu dans le ballon ;

C_p : Chaleur spécifique du caloporteur ;

ΔT : Différence de température initiale et finale ;

ρ : Masse volumique de l'eau ;

V : Volume du ballon.

Equation qui régit le transfert de chaleur dans le ballon de stockage :

$$-\rho * V * c_p * \frac{dT}{dt} = \frac{T-T_i}{\text{Req cylindre}} \Rightarrow \frac{dT}{T-T_i} = -\rho * V * c_p * \frac{dt}{\text{Req cylindre}} \quad (\text{III.32})$$

En intégrant les deux termes de l'équation on trouve

$$T = K * \exp\left[-\frac{\rho * V * c_p}{\text{Req cylindre}} * t\right] + T_i \quad (\text{III.33})$$

III.8.3. Les différentes formes qu'on pourra utiliser dans la fabrication des ballons de stockage de chaleur :

Trois formes sont envisageables pour fabriquer un ballon de stockage de chaleur, il y a la forme sphérique ; cylindrique et parallélépipédique la question qu'on pose ici est quelle est la forme qui convient le mieux pour fabriquer le ballon.

On cherche à minimiser la surface d'échange et à maximiser le volume de stockage pour faire ça on fixe un volume égale pour toutes les forme et on calcule les surfaces d'échange correspondantes pour toutes ces formes et la forme dans la surface d'échange est la plus petite est la meilleur pour le stockage de la chaleur et on a trouvé que la forme sphérique est la plus adéquate ensuite viens la forme cylindrique et enfin la forme cubique mais la forme sphérique est difficile à réaliser c'est pour ça qu'on adopte la forme cylindrique.

III.9. REGULATEUR DE CHAUFFAGE [22]

Le régulateur de chauffage est un système qui régule la température de la pièce à chauffer et dans le chauffage ou on utilise un chauffage d'appoint le régulateur actionne ce dernier pour apporter de la chaleur additionnelle dans le cas ou le chauffage économique ne suffit pas.

➤ Type d'installations

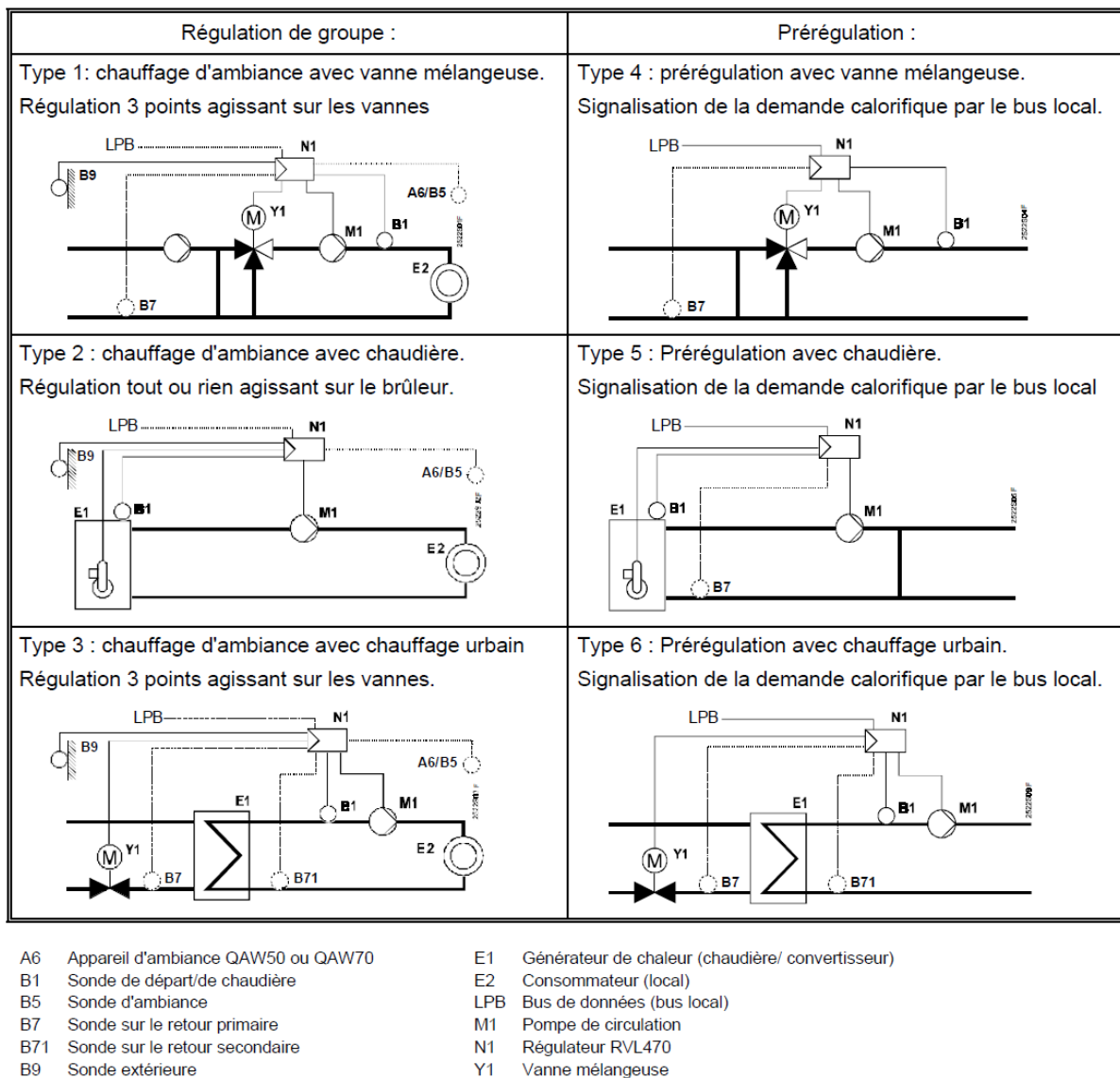


Fig. III.25: Différents systèmes de régulation [22]

III.10.CONCLUSION

Ce chapitre a permis de présenter en détail les différents capteurs thermiques ainsi que le principe de fonctionnement de ces éléments et les paramètres influençant leurs rendements, en outre on a même présenté les lois mathématiques concernant le dimensionnement des autres éléments constituant tous le système de l'installation du chauffage solaire d'une maison par dalle chauffante.

CHAPITRE IV
CALCUL DES
DEPERDITIONS

IV.1.INTRODUCTION

L'objectif de ce chapitre est précisément d'évaluer certains paramètres d'un tel système pour une habitation individuelle de taille moyenne implantée dans la région de Tizi-Ouzou et de faire un bilan détaillé concernant les déperditions thermiques.

Rappelons que notre habitation se constitue de deux chambres, d'une salle de bain, d'une cuisine, et d'un salon.

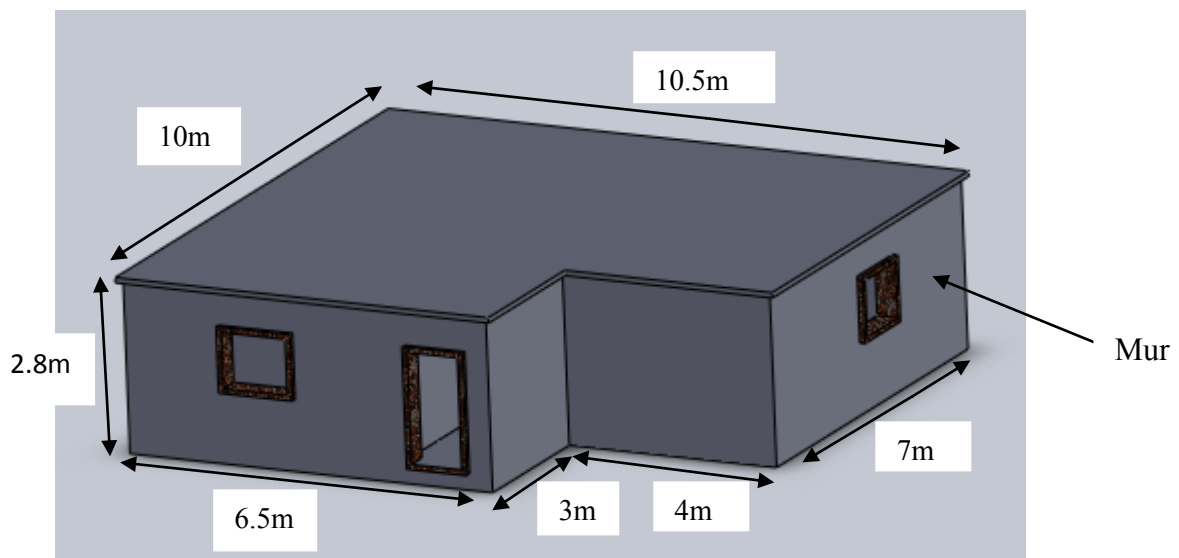


Fig. IV.1: Dimensions de la Maison F3 située à la région de Tizi-Ouzou

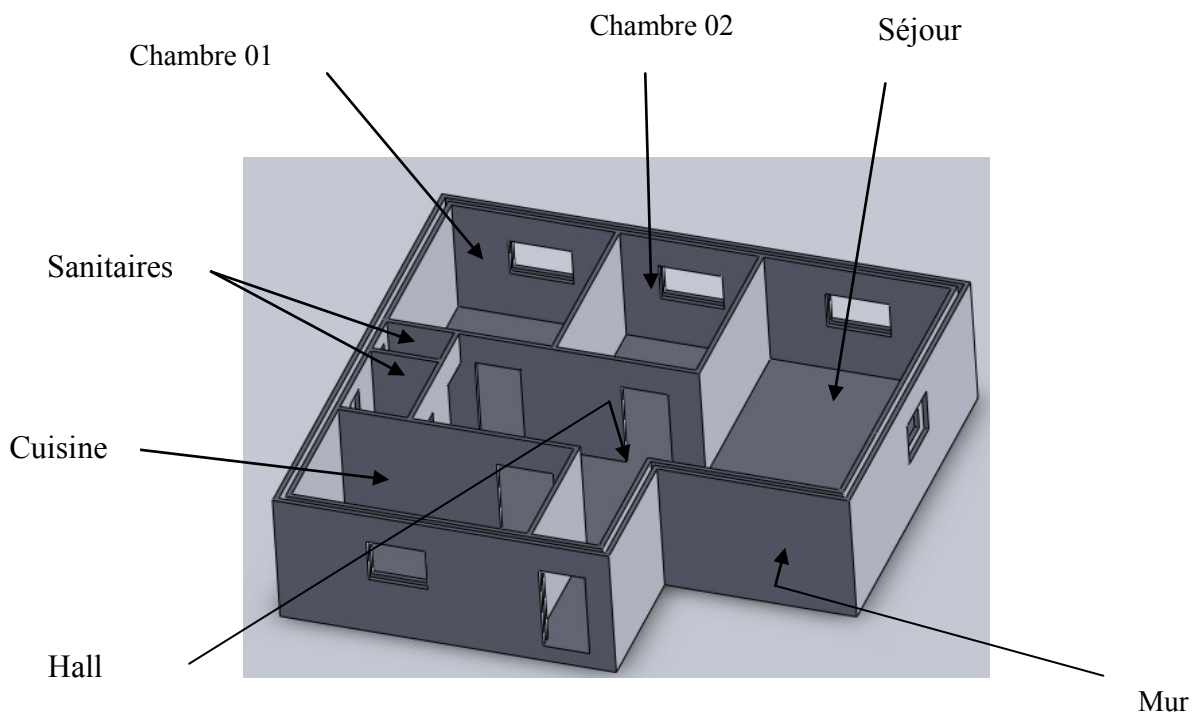


Fig. IV.2: coupe de dessus de la Maison F3

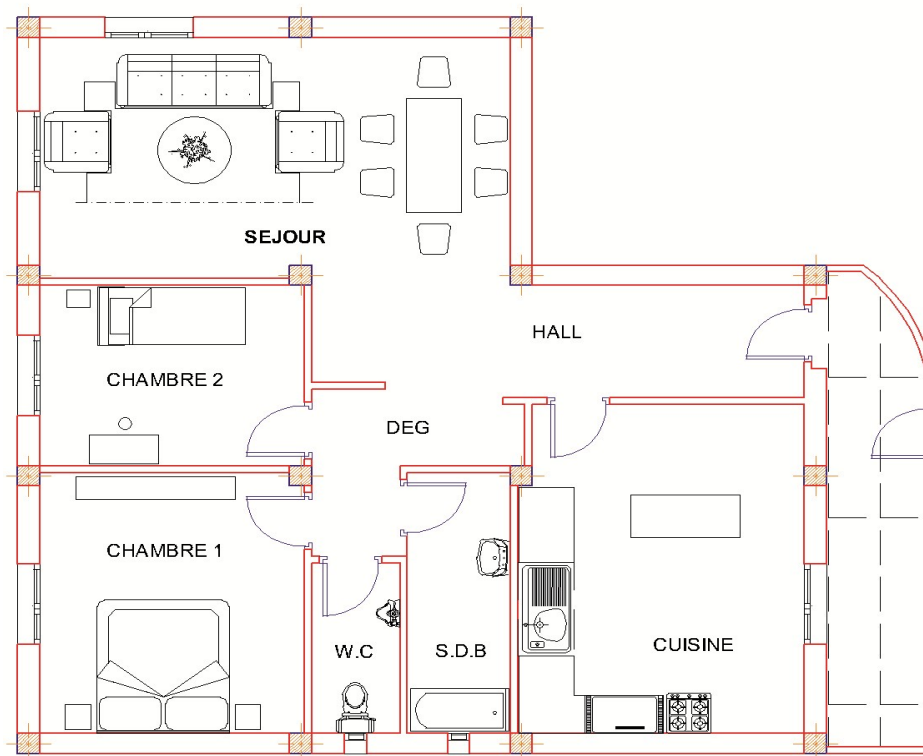


Fig. IV.3 : Plan de R.D.C de la maison F3

IV.2.PRESENTATION

IV.2.1.Description de la maison :

La maison pour laquelle on fait notre étude est une maison individuelle d'une surface de 93m² de construction habituelle.

❖ Position géographique

Latitude (φ) : 36°42' Nord

Longitude (λ) : 4°08' Est

Albédo (a) : 0,2

Altitude (Alt) : 150,40m

Exposition au vent : Moyen

Exposition à l'insolation : Moyen

IV.2.1. Paramètres climatiques et thermodynamique :

❖ Condition de base

Tableau IV.1: Paramètres climatiques

| | Température (C°) |
|-----------|------------------|
| Intérieur | 21 |
| Extérieur | 0 |

IV.2.2. Paramètres thermiques : [23]

Les coefficients de convection intérieur et extérieure de l'air à respectivement à 21°C et 0°C sont :

$$h_i = 7 \text{ W/m}^2\text{°C} \quad \text{et} \quad h_e = 15 \text{ W/m}^2\text{°C}$$

❖ Constitution des murs extérieurs

Tableau IV.2: constitution des murs extérieurs

| Constituant | e(m) | $\lambda(\text{W/m}^{\circ}\text{C})$ | $R''(\text{m}^2\text{°C/W})$ |
|-------------------------|------|---------------------------------------|------------------------------|
| Plâtre courant d'enduit | 0.01 | 0.35 | 0.028 |
| Mortier de ciment | 0.01 | 1.4 | 0.007 |
| Brique creuse | 0.1 | 0.2 | 0.5 |
| Lame d'air | 0.1 | 0.16 | 0.625 |
| Brique creuse | 0.1 | 0.2 | 0.5 |
| Mortier de ciment | 0.01 | 1.4 | 0.007 |
| Plâtre courant d'enduit | 0.01 | 0.35 | 0.028 |

❖ Constitution des fenêtres

Tableau IV.3: Constitution des fenêtres

| Constituant | e(m) | $\lambda(\text{W/m}^{\circ}\text{C})$ | $R''(\text{m}^2\text{°C/W})$ |
|-------------|-------|---------------------------------------|------------------------------|
| Bois léger | 0.007 | 0.35 | 0.05 |
| Lame d'air | 0.07 | 1.4 | 0.4375 |
| Vitre | 0.004 | 0.2 | 0.0028 |

Surface de la fenêtre $L \times h = 1,2 \times 1,6 = 1.92 \text{ m}^2$

❖ Constitution de la porte

Tableau IV.4: Constitution de la porte

| Constituant | e(m) | $\lambda(\text{W/m}^{\circ}\text{C})$ | $R''(\text{m}^2\text{°C/W})$ |
|-------------|------|---------------------------------------|------------------------------|
| Bois lourd | 0.03 | 0.2 | 0.15 |

Surface de la porte $L \times h = 0.9 \times 2 = 1.8 \text{ m}^2$

❖ Constitution des impostes

Tableau IV.5: Constitution des impostes

| Constituant | e(m) | $\lambda(\text{W/m}^{\circ}\text{C})$ | $R''(\text{m}^2\text{°C/W})$ |
|-------------|-------|---------------------------------------|------------------------------|
| Vitre | 0.004 | 1.4 | 0.0028 |

Surface de l'imposte $L \times h = 0.3 \times 0.3 = 0.09 \text{ m}^2$

❖ Constitution du plafond (toiture)

Tableau IV.6: Constitution du plafond

| Constituant | e(m) | λ (W/m°C) | R'' (m²°C /W) |
|---------------------|------|-------------------|---------------|
| Pierre très tendres | 0.05 | 0.85 | 0.058 |
| Béton plain | 0.08 | 1.75 | 0.045 |
| Entrevous | 0.12 | 0.12 | 1 |
| Mortier de ciment | 0.01 | 1.4 | 0.007 |
| Plate d'enduit | 0.01 | 0.35 | 0.028 |

IV.3.CALCUL DES RESISTANCES THERMIQUES DES CONSTITUANTS DE LA MAISON

On peut modéliser notre maison constituée de six murs extérieurs, cinq fenêtres, deux impostes et une porte comme le montre la figure (IV.4):

Le **Mur₁** constitué de cinq fenêtres ; deux imposte et d'une porte est d'une surface $L \times H = 29,4 \text{ m}^2$ et les cinq murs restants, 2, 3, 4, 5,6 ne comportent aucun de ces éléments cités.

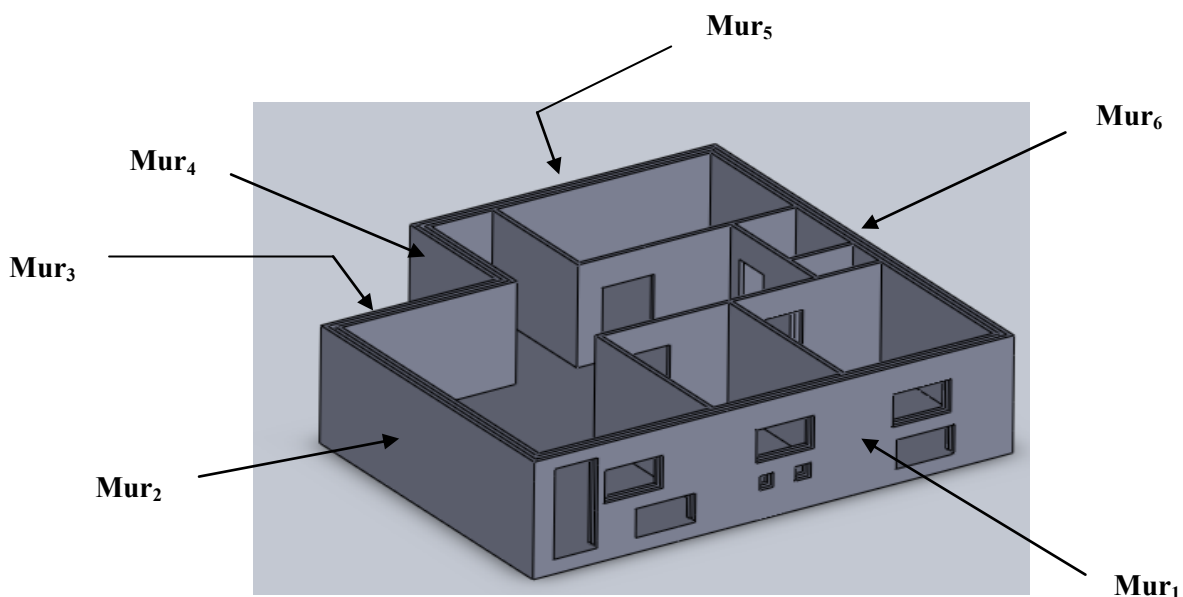


Fig. IV.4: Schéma équivalent de la maison F3

IV.3.1. Résistance thermique de Mur₁ R_{Mur1} :

➤ Résistance thermique de mur extérieur

Les résistances de Mur sont en série, de l'équation (II.8) on peut calculer R''_{Mur} :

$$R''_{\text{Mur}} = \sum R''_i$$

$$R''_{\text{Mur}} = 0.028 + 0.007 + 0.5 + 0.625 + 0.5 + 0.007 + 0.028 = 1.695 \text{ m}^2\text{°C /W}$$

$$R''_{\text{Mur}} = 1.695 \text{ m}^2\text{C} / \text{W}$$

❖ **Resistance thermique de la fenêtre :**

De l'équation (II.8) on peut écrire aussi pour la fenêtre :

$$R''_{\text{fenetre}} = \sum R''_i$$

$$R''_{\text{fenetre}} = 0.05 + 0.4375 + 0.0028 = 0.49 \text{ m}^2\text{C} / \text{W}$$

➤ **Resistance thermique de l'imposte**

$$R''_{\text{imposte}} = 0.0028 \text{ m}^2\text{C} / \text{W}$$

➤ **Resistance thermique de la porte**

$$R''_{\text{porte}} = 0.15 \text{ m}^2\text{C} / \text{W}$$

➤ **Resistance thermique du plafond**

De l'équation (II.8) on peut écrire :

$$R''_{\text{plafond}} = \sum R''_i$$

$$R''_{\text{plafond}} = 0.058 + 0.045 + 1 + 0.007 + 0.028 = 1.138 \text{ m}^2\text{C} / \text{W}$$

A partir de calculs précédents des résistances on peut calculer maintenant $R_{\text{Mur}1}$

- Surface de la porte $S = 1.8\text{m}^2$ $\Rightarrow R_{\text{porte}} = \frac{R''_{\text{porte}}}{S} = 0.083 \text{ }^\circ\text{C} / \text{W}$
- Surface de la fenêtre $S = 1.92\text{m}^2$ $\Rightarrow R_{\text{fenetre}} = \frac{R''_{\text{fenetre}}}{S} = 0.25 \text{ }^\circ\text{C} / \text{W}$

Les cinq fenêtres sont en parallèles, on applique l'équation (II.9) on trouve la résistance équivalente $R_{\text{eq fenetre}}$:

$$\frac{1}{R_{\text{eq}}} = \sum \frac{1}{R_i} \quad \text{donc :}$$

$$\frac{1}{R_{\text{eq fenetre}}} = \frac{5}{R_{\text{fenetre}}} = 20 \text{ W}/^\circ\text{C} \quad \Rightarrow R_{\text{eq fenetre}} = 0.05 \text{ }^\circ\text{C} / \text{W}$$

- Surface de l'imposte $S = 0.09\text{m}^2$ $\Rightarrow R_{\text{imposte}} = \frac{R''_{\text{imposte}}}{S} = 0.031 \text{ }^\circ\text{C} / \text{W}$

Les deux impostes sont en parallèles l'équation (II.9) nous permet de calculer la résistance équivalente $R_{\text{eq imposte}}$:

$$\frac{1}{R_{\text{eq imposte}}} = \frac{2}{R_{\text{imposte}}} = 64.516 \text{ W}/^\circ\text{C} \quad \Rightarrow R_{\text{eq imposte}} = 0.015 \text{ }^\circ\text{C} / \text{W}$$

- Le reste de la surface de Mur_1 $S = 17.82\text{m}^2$ $\Rightarrow R = \frac{R''_{\text{Mur}}}{S} = 0.095 \text{ }^\circ\text{C} / \text{W}$

Maintenant on peut déduire la résistance thermique de **Mur₁** donc :

Tous les éléments constituant le **Mur₁** sont en parallèles de l'équation (II.9) on trouve :

$$\frac{1}{R_{Mur1}} = \frac{1}{R_{porte}} + \frac{1}{R_{\text{éq fenetre}}} + \frac{1}{R_{\text{éq imposte}}} + \frac{1}{R} = 109.13 \text{ W/}^\circ\text{C} \Rightarrow R_{Mur1} = 0.0091^\circ\text{C/W}$$

IV.3.2. Résistance thermique de Mur₂ R_{Mur2} :

La surface de **Mur₂** A₂ = 19.6 m² $\Rightarrow R_{Mur2} = \frac{R''_{Mur}}{A_2} = 0.0864^\circ\text{C/W}$

IV.3.3. Résistance thermique de mur₃ R_{Mur3} :

La surface de **Mur₃** A₃ = 11.2 m² $\Rightarrow R_{Mur3} = \frac{R''_{Mur}}{A_3} = 0.1513^\circ\text{C/W}$

IV.3.4. Résistance thermique de Mur₄ R_{Mur4} :

La surface de **Mur₄** A₄ = 8.4 m² $\Rightarrow R_{Mur4} = \frac{R''_{Mur}}{A_4} = 0.20^\circ\text{C/W}$

IV.3.5. Résistance thermique de Mur₅ R_{Mur5} :

La surface de **Mur₅** A₅ = 18.2 m² $\Rightarrow R_{Mur5} = \frac{R''_{Mur}}{A_5} = 0.093^\circ\text{C/W}$

IV.3.6. Résistance thermique de Mur₆ R_{Mur6} :

La surface de **Mur₆** A₆ = 28 m² $\Rightarrow R_{Mur6} = \frac{R''_{Mur}}{A_6} = 0.060^\circ\text{C/W}$

IV.3.7. Résistance thermique du plafond R_{plafond} :

La surface du plafond A_{plafond} = 93 m² $\Rightarrow R_{plafond} = \frac{R''_{plafond}}{A_{plafond}} = 0.0122^\circ\text{C/W}$

IV.4. CALCUL DES DEPERDITIONS

IV.4.1. Déperdition par transmission :

Les déperditions de chaleur se font à travers les murs et le plafond tandis que le plancher fournit de la chaleur donc on peut trouver à partir de la formule (II.7) ou bien de (II.17) de transfert de chaleur la puissance perdue pour chaque Mur, avec T_i - T_e = 21°C.

Tableau IV.7: calcul des déperditions par transmission des parois

| Parois extérieurs + Plafond | Surfaces A_i (m ²) | Resistances $R_{Mur\ i}$ (°C/W) | Resistances équivalentes $R_{eqi} = \frac{1}{h_i A_i} + R_{Mur\ i} + \frac{1}{h_e A_i}$ (h_i, h_e : coefficient d'échange intérieur, extérieur) | Chaleur Perdue $q_i(W) = \frac{T_i - T_e}{R_{eqi}}$ |
|------------------------------|----------------------------------|---------------------------------|--|--|
| Mur1 | 29.4 | 0.0091 | 0.016 | 1312.5 |
| Mur2 | 19.6 | 0.0864 | 0.097 | 216.50 |
| Mur3 | 11.2 | 0.1513 | 0.17 | 123.53 |
| Mur4 | 8.4 | 0.20 | 0.224 | 93.75 |
| Mur5 | 18.2 | 0.093 | 0.1045 | 200.95 |
| Mur6 | 28 | 0.060 | 0.067 | 313.43 |
| Plafond | 93 | 0.0122 | 0.0144 | 1458.33 |
| LA SOMME $q_I = \sum q_i$ | | | | 3719 |

➤ Nous avons obtenus une puissance calorifique qui vaut : **3719 W** soit **3.719 KW**

IV.4.2. Déperditions par infiltration : [23]

La cause de ces déperditions est due à la différence entre la quantité de chaleur apportée par l'air froid qui s'infiltré dans le local et la quantité de chaleur emportée par l'air qui sort. Les déperditions par infiltration concernent les portes et les fenêtres, l'équation régissant celle-ci est donnée par l'équation (II.19).

Tableau IV.8: perméabilités des constituants de Mur₁

| Constituant | Perméabilité a (W/m°C) | Longueur (m) | Hauteur (m) |
|-------------|--------------------------|--------------|-------------|
| Fenêtre | 2.02 | 1.2 | 1.6 |
| Imposte | 1.6 | 0.3 | 0.3 |
| Porte | 1.8 | 0.9 | 2 |

❖ Dans notre cas $Z_E=0$ et $(T_i - T_e) = 21^\circ\text{C}$

Tableau IV.9: calcul des déperditions par infiltration de la maison

| Constituant | $q_I(W) = \sum (a L) * C * H * (T_i - T_e)$ |
|-------------|---|
| Fenêtre 1 | 124 |
| Fenêtre 2 | 124 |
| Fenêtre 3 | 124 |
| Fenêtre 4 | 124 |
| Fenêtre 5 | 124 |
| Imposte 1 | 21 |
| Imposte 2 | 21 |
| Porte 1 | 114.44 |
| LA SOMME | 776.44 |

❖ Les déperditions par infiltration d'air $q_I = 776.44 \text{ W}$

$$q = q_T + q_I = 3719 + 776.44 = 4495.44 \text{ W}$$

❖ Pour sur dimensionner la maison on prend un coefficient de correction égale à 1.2 donc :

$$q_{\text{tot}} = 1.2 * q = 5394.53 \text{ W} \quad [28]$$

Donc : $q_{\text{tot}} = 5.39453 \text{ KW}$

IV.5.CALCUL DES BESOINS EN CHAUFFAGE [13]

L'énergie de chauffage nécessaire pour la période de chauffe, qui s'étend du moi de novembre au moi de mars pour une température de chauffe $T_c = 21^\circ\text{C}$ égale à :

$$Q_e = 0.024 * G V * N_{dj} \text{ (KWh)} \quad (\text{II.20})$$

On a:

$$GV = \frac{q_{\text{tot}}}{\Delta T} = \frac{5394.53}{21-0} = 256.88 \text{ W/}^\circ\text{C}$$

Les températures moyennes mensuelles et les degrés jour pour la saison de chauffe de 2000 à 2010 sont donnés dans les tableaux IV.10 et IV.11 :

Tableau IV.10: Relevé des températures moyennes mensuelle pour la saison de chauffe des années : 2001-2002-2003-2004-2005-2006-2007-2008-2009-2010 [24].

| Mois | 2001 TPm | 2002 TPm | 2003 TPm | 2004 TPm | 2005 TPm | 2006 TPm | 2007 TPm | 2008 TPm | 2009 TPm | 2010 TPm | TPm annuelle °C |
|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|--------------------|
| Nov | 14 | 15,2 | 15,7 | 13,3 | 13 | 17,3 | 13,6 | 13,5 | 15,3 | 14,3 | 14,52 |
| Déc | 09,2 | 12,9 | 10,6 | 11,5 | 10,6 | 12,1 | 10,6 | 13,1 | 15,8 | 11,2 | 11,76 |
| Jan | 10,8 | 09,7 | 10,1 | 10,6 | 07,4 | 09,2 | 11,4 | 11 | 10,8 | 11,4 | 09,16 |
| Fév | 10,3 | 11,4 | 09,3 | 12,2 | 07,7 | 10 | 13 | 12,6 | 10,4 | 12,8 | 10,97 |
| Mars | 16,8 | 13,7 | 13,8 | 13,6 | 12,8 | 14,2 | 12,3 | 13 | 12,7 | 13,7 | 13,66 |

Tableau IV.11: Les valeurs des degrés jour pour la saison de chauffe de 2000 à 2010.

| Mois | Nov | déc | Jan | Fév | Mars |
|---|-------|--------|--------|--------|--------|
| Température de chauffe T_c (°C) | 21 | 21 | 21 | 21 | 21 |
| Température journalière T_{mj}(°C) | 14,52 | 11,76 | 09,16 | 10,97 | 13,66 |
| $\Delta T = T_c - T_{mj}$ | 6.48 | 9.24 | 11.84 | 10.03 | 7.34 |
| Degré jour (N_{dj}) | 194.4 | 286.44 | 367.04 | 280.84 | 227.54 |

-La totalité des degrés jour : **N_{dj} = 1356.26 °C**

$$Q_e = 0.024 * 256.88 * 1356.26 = 8361.50 \text{ KWh}$$

Finalement L'énergie à fournir pour le chauffage est :

| |
|------------------------------------|
| Q_e = 8361.50 KWh |
|------------------------------------|

IV .6.CONCLUSION

Ce chapitre a été consacré au bilan thermique hivernal d'une maison individuelle ainsi que le calcul des besoins en énergie de chauffage.

CHAPITRE V
DIMENSIONNEMENT
DE L'INSTALLATION
ET ETUDE
ECONOMIQUE

V.1.INTRODUCTION

Ce chapitre sera consacré au dimensionnement des éléments de l'installation du chauffage solaire par dalle chauffante et de s'intéresser au temps du régime transitoire de la dalle et la maison jusqu'au régime permanent ou la température de confort est atteinte, tenant compte des besoins évalués au chapitre précédent et une étude économique consistant à déterminer le prix de revient du KWh solaire thermique.

V.2.LES MATERIAUX UTILISES ET LEURS CARACTERISTIQUES THERMO-PHYSIQUES : [23]

❖ La dalle chauffante

Tableau V.1: constitution de la dalle chauffante

| Constituant | e(m) | S (m ²) | V(m ³) | ρ (Kg/m ³) | M(Kg) | C _p (j /KgK) | M*C _p (j/K) |
|-----------------|------|---------------------|--------------------|-----------------------------|-------|-------------------------|------------------------|
| Béton plain | 0.12 | 93 | 11.16 | 2200 | 24552 | 1080 | 26516160 |
| Sable gravillon | 0.05 | 93 | 4.65 | 1800 | 8370 | 792 | 6629040 |
| Carreaux de sol | 0.02 | 93 | 1.86 | 1900 | 3534 | 936 | 3307824 |

La capacité thermique de la dalle est 36453024 j /K

❖ Les murs de séparation

Tableau V.2: constitution des murs de séparation

| Constituant | e(m) | S(m ²) | V(m ³) | ρ (Kg/m ³) | M(Kg) | C _p (j /KgK) | M*C _p (j/K) |
|-------------------------|------|--------------------|--------------------|-----------------------------|--------|-------------------------|------------------------|
| Plâtre courant d'enduit | 0.01 | 57.6 | 0.576 | 1150 | 662.4 | 1008 | 667699.2 |
| Mortier de ciment | 0.01 | 57.6 | 0.576 | 1900 | 1094.4 | 864 | 945561.6 |
| Brique creuse | 0.1 | 57.6 | 5.760 | 650 | 3744 | 1008 | 3773952 |
| Mortier de ciment | 0.01 | 57.6 | 0.576 | 1900 | 1094.4 | 864 | 945561.6 |
| Plâtre courant d'enduit | 0.01 | 57.6 | 0.576 | 1150 | 662.4 | 1008 | 667699.2 |

La capacité thermique des murs de séparation est 7000473.6 j/K

❖ La rangé intérieur des murs extérieurs

Tableau V.3: constitution de la rangé intérieure des murs extérieurs

| Constituant | e(m) | S(m ²) | V(m ³) | ρ(Kg/m ³) | M(Kg) | C _p (j /KgK) | M*C _p (j/K) |
|-------------------------|------|--------------------|--------------------|-----------------------|--------|-------------------------|---------------------------|
| Plâtre courant d'enduit | 0.01 | 103.22 | 1.032 | 1150 | 1186.8 | 1008 | 1196294.4 |
| Mortier de ciment | 0.01 | 103.22 | 1.032 | 1900 | 1960.8 | 864 | 1694131.2 |
| Brique creuse | 0.1 | 103.22 | 10.32 | 650 | 6708 | 1008 | 6761664 |

La capacité thermique des murs extérieurs est 9652089.6 j/K

❖ Plafond (toiture)

Tableau V.4: constitution du plafond

| Constituant | e(m) | S(m ²) | V(m ³) | ρ(Kg/m ³) | M(Kg) | C _p (j /KgK) | M*C _p (j/K) |
|---------------------|------|--------------------|--------------------|-----------------------|---------|-------------------------|---------------------------|
| Pierre très tendres | 0.05 | 93 | 4.65 | 1400 | 6510 | 936 | 6093360 |
| Béton plain | 0.08 | 93 | 7.44 | 2200 | 16368 | 1080 | 17677440 |
| Entrevous | 0.12 | 93 | 11.16 | 1185 | 13224.6 | 1080 | 14282568 |
| Mortier de ciment | 0.01 | 93 | 0.93 | 1900 | 1767 | 864 | 1526688 |
| Plâtre d'enduit | 0.01 | 93 | 0.93 | 1159 | 1077.87 | 1008 | 1086492.96 |

La capacité thermique de la toiture est 40666548.96 j/K

❖ L'air emprisonné dans la maison

Tableau V.5: constitution de l'air de la maison

| Constituant | V(m ³) | ρ(Kg/m ³) | M(Kg) | C _p (j /KgK) | M*C _p (j/K) |
|-------------|--------------------|-----------------------|--------|-------------------------|---------------------------|
| Air | 260.4 | 1.2 | 312.48 | 1005 | 314042.4 |

La capacité thermique de l'air emprisonné dans la maison est 314042.4 j/K

La capacité thermique globale de la maison est 91434562.56 j/K

V.3.DIMENSIONNEMENT DE LA DALLE CHAUFFANTE

L'étude détaillée de la dalle chauffante constitue un défi très important par ce qu'on doit prendre en compte tous les transferts de chaleur qui existent à savoir les transferts par conduction qui font intervenir une géométrie très complexe et dans ce genre de situations on se sert de logiciels de simulation comme ANSYS où on cherche des modèles qui peuvent nous donner des résultats acceptables, c'est pour cette raison que nous avons établi des modèles très simplifiés pour le calcul de la dalle chauffante. Notre travail consiste à étudier le régime permanent du transfert de chaleur de la dalle et de trouver le débit massique de l'eau qui circule dans les tuyaux qui sont disposés sous la dalle avec une forme spirale, ensuite d'étudier le régime transitoire pour trouver le temps que prend la dalle chauffante pour partir de l'état initiale vers l'état permanent.

V.3.1.Régime permanent :

Par utilisation de l'équation (II.12) on aura:

$$q_{tot} = \dot{m}_e * C_{pe} * (T_{m,e} - T_{m,s})$$

$$D'ou : \dot{m}_e = \frac{q_{tot}}{C_{pe} (T_{m,e} - T_{m,s})}$$

C_{pe} : Capacité thermique massique de l'eau liquide et égale à 4185 J/Kg K;

\dot{m}_e : Débit massique de l'eau qui circule dans le réseau;

$T_{m,e}$: Température d'entrée de l'eau dans la spirale et égale à 50 °C;

$T_{m,s}$: Température de sortie de l'eau de la spirale et égale à 40 °C;

q_{tot} : Déperditions totales de la maison.

A.N:

$$\dot{m}_e = \frac{5394,53}{4185 * (50 - 40)} = 0.129 \text{ (Kg/s)}$$

V.3.2.Détermination de la température finale de la dalle :

La dalle chauffante atteint la température finale T_{df} lorsque le régime permanent est atteint donc par utilisation de l'équation (II.10) on peut écrire :

$$h_i * A1 * (T_{df} - T_i) = q_{tot} \Rightarrow T_{df} = \frac{q_{tot}}{h_i * A1} + T_i$$

h_i : Coefficient de convection naturel dans l'air de la maison;

$A1$: Surface de la dalle chauffante;

T_i : La température du régime permanent de l'air de la maison;

Q_{tot} : Déperditions thermiques totales de la maison.

A.N:

$$T_{\text{df}} = \frac{5394,53}{7*93} + 21 \Rightarrow T_{\text{df}} = 29.28 \text{ C}^\circ$$

V.3.3.L'expression de la puissance cédée par la spirale vers la dalle chauffante :

On sait que le tube a une température de sortie qui est reliée à la température de la dalle T_d par l'équation (II.16) :

$$\frac{T_m(L) - T_d}{T_{m,e} - T_d} = \exp\left[\frac{L}{f}\right] \text{ avec } f : \text{ est une constante qui dépend de plusieurs paramètres}$$

L : est la longueur du tube sous forme de spirale.

A $x = L$:

$T_m(L) = T_{m,s}$: la température de sortie de l'eau du tube.

D'où : $T_{m,e} - T_d = \beta * (T_{m,s} - T_d)$ avec β : est une constante positive égale à $\exp(-\frac{L}{f})$

Puisque β est une constante sa valeur dans le régime permanent est égale à sa valeur dans le régime transitoire et on connaît les valeurs de $T_{m,e}$ et de $T_{m,s}$ qui sont respectivement dans le régime permanent égale à 50°C et 40°C dans ces conditions on aura :

$$\beta = \frac{T_{m,e} - T_{\text{df}}}{T_{m,s} - T_{\text{df}}} = \frac{50 - 29.28}{40 - 29.28} = 1.93$$

L'expression de $T_{m,s}$ en fonction de T_d et $T_{m,e}$ est de la forme :

$$T_{m,s} = \frac{T_{m,e}}{\beta} + \frac{\beta - 1}{\beta} * T_d$$

V.3.4.L'expression du flux de chaleur transmis à la dalle chauffante par la tuyauterie :

Pour trouver son expression on a qu'à remplacer $T_{m,s}$ dans l'équation (II.12) :

$$F_t = C_{pe} * \dot{m}_e * (T_{m,e} - T_{m,s})$$

Et on aura : $F_t = \frac{\beta - 1}{\beta} C_{pe} * \dot{m}_e * (T_{m,e} - T_d)$

V.3.5. Calcul du temps du régime transitoire pour la dalle :

Pour faciliter les calculs, on suppose que lorsque la dalle chauffante se charge de chaleur, la température de l'air de la maison reste constante et égale à la température initiale de la maison et on aura une valeur du temps supérieur au temps réel car la température de l'air de la maison augmente avec l'augmentation de la température de la dalle donc si on prend la température de l'air de la maison égale à la température initiale qui est la plus petite, les déperditions de la dalle vers l'air de la maison seront maximales ce qui va donner un temps de régime transitoire supérieur à la valeur réelle.

L'équation du bilan d'énergie pour la dalle chauffante s'écrit comme dans l'équation (II.2) :

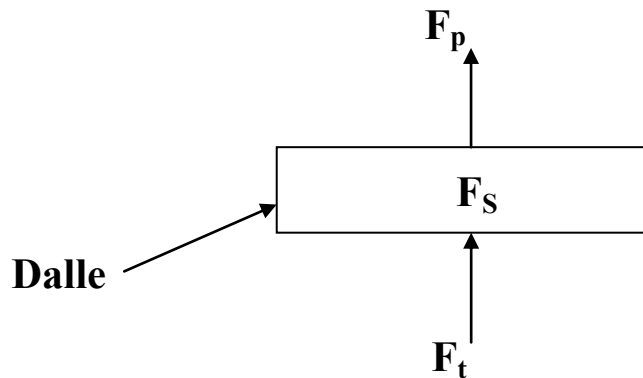


Fig. V.1. représentation du bilan de flux de chaleur de la dalle

$$F_t = F_p + F_s$$

$$F_t = \frac{\beta-1}{\beta} C_{pe} * \dot{m}_e * (T_{m,e} - T_d) \quad / F_t : \text{flux de chaleur transmis à la dalle chauffante.}$$

$$F_p = \frac{T_d - T_a}{R_{eq}} \quad / F_p : \text{flux de chaleur perdu par la dalle chauffante et } R_{eq} \text{ est une résistance équivalente qu'on va déterminer.}$$

$$F_s = C_{pd} * m_d \frac{\partial T_d}{\partial t} \quad / F_s : \text{flux de chaleur stocké dans la dalle chauffante.}$$

L'équation devient sous la forme suivante :

$$\frac{\partial T_d}{\partial t} + C_0 * (T_d - \frac{C_1}{C_0}) = 0 \Rightarrow T_d = (T_{di} - \frac{C_1}{C_0}) * \exp(-C_0 t) + \frac{C_1}{C_0}$$

$$t_d = \frac{1}{C_0} * \ln\left(\frac{(T_{di} - \frac{C_1}{C_0})}{0.95 * T_{df} - \frac{C_1}{C_0}}\right)$$

$$C_0 = \frac{C_{pe} * \dot{m}_e * \frac{(\beta-1)}{\beta} + \frac{1}{R_{eq}}}{C_{pd} * m_d} \quad ; \quad C_1 = \frac{C_{pe} * \dot{m}_e * \frac{(\beta-1)}{\beta} * T_{m,e} + \frac{1}{R_{eq}} * T_e}{C_{pd} * m_d} \quad ;$$

$$\frac{c_1}{c_0} = \frac{C_{pe} \cdot \dot{m} \cdot \frac{(\beta-1)}{\beta} \cdot T_{m,e} + \frac{1}{Req} \cdot T_e}{C_{pe} \cdot \dot{m} \cdot \frac{(\beta-1)}{\beta} + \frac{1}{Req}} .$$

T_{di} : Température Initiale de la dalle chauffante ;

T_{df} : Température finale de la dalle chauffante ;

T_d : Température de la dalle chauffante ;

T_e : Température de l'air extérieur ;

m_d : Masse de la dalle.

➤ Détermination de la résistance équivalente de la dalle chauffante

D'après l'équation qui régie la température de la dalle on remarque que le régime permanent est atteint lorsque $T_d = \frac{c_1}{c_0}$ donc : $T_{df} = 302.43 \text{ K}$

$$\frac{c_1}{c_0} = \frac{C_{pe} \cdot \dot{m} \cdot \frac{(\beta-1)}{\beta} \cdot T_{m,e} + \frac{1}{Req} \cdot T_e}{C_{pe} \cdot \dot{m} \cdot \frac{(\beta-1)}{\beta} + \frac{1}{Req}} = T_{df}$$

A.N:

$$\frac{4185 \cdot 0.129 \cdot \frac{(1.93-1)}{1.93} \cdot 323.15 + \frac{1}{Req} \cdot 273.15}{4185 \cdot 0.129 \cdot \frac{(1.93-1)}{1.93} + \frac{1}{Req}} = 302.43 \Rightarrow Req = \frac{1}{184.09} \text{ W}^{-1} \cdot \text{C}$$

$$C_0 = \frac{C_{pe} \cdot \dot{m} \cdot \frac{(\beta-1)}{\beta} + \frac{1}{Req}}{C_{pd} \cdot m_d} \Rightarrow C_0 = \frac{260.14 + 184.09}{36453024} \Rightarrow C_0 = \frac{1}{82058.9}$$

Pour trouver le temps du régime permanent de la dalle chauffante on utilise la formule suivante :

$$t_d = \frac{1}{c_0} \cdot \ln\left(\frac{(T_{di} - \frac{c_1}{c_0})}{0.95 \cdot T_{df} - \frac{c_1}{c_0}}\right) \Rightarrow t_d = 82058.9 \cdot \ln\left(\frac{(273 - 302.43)}{0.95 \cdot 302.43 - 302.43}\right)$$

$$\Rightarrow t_d = 54223.46 \text{ s} = 15.06 \text{ Heures}$$

Une fois que la dalle chauffante a atteint le régime permanent, on calcule le temps qu'il faut pour porter la température de l'air de la maison de 0 C° à 95% de la température de régime permanent avec la dalle chauffante et pour calculer ce temps on va adopter une méthode qui donne un temps plus loin du temps réel mais plus simplement, cette méthode consiste à

calculer le flux de chaleur moyen entrant et le flux de chaleur moyen sortant et la différence entre les deux est égale au flux de chaleur stocké .

$$E_{\text{emoy}} - E_{\text{smoy}} = E_{\text{st moy}} \quad \text{qui est tirée de l'équation (II.2)}$$

$E_{\text{e moy}}$: Flux de chaleur entrant moyen ;

$E_{\text{s moy}}$: Flux de chaleur sortant moyen ;

$E_{\text{st moy}}$: Flux de chaleur stocké moyen.

$$E_{\text{e moy}} = 0.5 * h_i * A1 * (T_{\text{df}} - T_e + T_{\text{df}} - T_i)$$

$$E_{\text{s moy}} = 0.5 * q$$

$$E_{\text{st moy}} = C_{\text{pa}} * m_a * \frac{\Delta T}{\Delta t} = C_{\text{pa}} * m_a * \frac{(T_i - T_e)}{\Delta t}$$

$$C_{\text{pa}} * m_a * \frac{(T_i - T_e)}{\Delta t} = 0.5 * h_i * A1 * (T_{\text{df}} - T_e + T_{\text{df}} - T_e) - 0.5 * q$$

$$\Delta t = \frac{C_{\text{pa}} * m_a * (T_i - T_e)}{0.5 * h_i * A1 * (T_{\text{df}} - T_e + T_{\text{df}} - T_i) - 0.5 * q}$$

A.N : pour l'air de la maison

$$\Delta t = \frac{314042.4 * (21 - 0)}{0.5 * 7 * 93 * (29.28 - 0 + 29.28 - 21) - 0.5 * 4495.44}$$

$$\Delta t_{\text{air}} = 660.94 \text{ s} = 11 \text{ min}$$

A.N : pour la maison

$$E_{\text{emoy}} = 0.5 * C_{\text{pe}} * m * \left(\frac{\beta - 1}{\beta}\right) * (2T_e - T_{\text{df}})$$

$$E_{\text{smoy}} = 0.5 q$$

$$E_{\text{st moy}} = C_{\text{pa}} * m_a * \frac{\Delta T}{\Delta t} = C_{\text{pa}} * m_a * \frac{(T_i - T_e)}{\Delta t}$$

$$C_{\text{pe}} * m * \left(\frac{\beta - 1}{\beta}\right) * (T_{\text{df}} - 0.5T_a) - 0.5 q = C_{\text{pa}} * m_a * \frac{(T_i - T_e)}{\Delta t}$$

$$\Delta t = \frac{C_{\text{p}} * m * (T_i - T_e)}{0.5 * C_{\text{pe}} * m * \left(\frac{\beta - 1}{\beta}\right) * (2T_e - T_{\text{df}}) - 0.5 * q}$$

$$\Rightarrow \Delta t = \frac{91434562.56 * (21 - 0)}{0.5 * 4185 * 0.129 * \left(\frac{1.93 - 1}{1.93}\right) * (100 - 29.28) - 0.5 * 4495.44}$$

$$\Delta t_{\text{maison}} = 276240.99 \text{ s} = 76.73 \text{ Heures} = 3 \text{ jours}$$

V.4.CALCUL DES APPORTS SOLAIRES

V.4.1.Fraction d'insolation:

Les valeurs de SS, SS₀ sont données par le tableau (V.6) et σ est calculé par l'équation (I.15) pour la saison de chauffe. Ces valeurs sont récupérées auprès du centre météorologique de Tizi-Ouzou, enregistrées entre 2001 et 2010. [24] [25]

Tableau V.6: Relevé des valeurs moyennes mensuelles des durées d'insolation (SS), et durées maximales mensuelles d'insolation (SS₀), et fractions d'insolation (σ) pour les années (2001.....2010)

| Mois | JR | SS ₀ | 2001 | | 2002 | | 2003 | | 2004 | | 2005 | | 2006 | | 2007 | | 2008 | | 2009 | | 2010 | | SS _{mov} | σ |
|------|----|-----------------|------|----------|------|----------|------|----------|------|----------|------|----------|------|----------|------|----------|------|----------|------|----------|------|----------|-------------------|----------|
| | | | SS | σ | SS | σ | SS | σ | SS | σ | SS | σ | SS | σ | SS | σ | SS | σ | SS | σ | SS | σ | | |
| | | | Nov | 15 | 10.1 | 5.56 | 0.59 | 4.06 | 0.40 | 4.70 | 0.46 | 5.06 | 0.50 | 5.93 | 0.59 | 5.30 | 0.52 | 7.10 | 0.70 | 0.90 | 0.09 | 6.06 | | |
| Dec | 11 | 9.6 | 4.93 | 0.51 | 3.58 | 0.37 | 5.00 | 0.52 | 3.77 | 0.39 | 3.90 | 0.41 | 5.10 | 0.53 | 4.30 | 0.45 | 3.90 | 0.41 | 4.48 | 0.47 | 3.41 | 0.35 | 4.24 | 0.44 |
| Jan | 17 | 9.8 | 4.50 | 0.46 | 4.70 | 0.48 | 4.20 | 0.43 | 4.35 | 0.44 | 5.45 | 0.56 | 5.10 | 0.52 | 4.20 | 0.43 | 6.10 | 0.62 | 5.87 | 0.60 | 3.48 | 0.35 | 4.80 | 0.49 |
| Fev | 15 | 10.7 | 8.10 | 0.76 | 6.82 | 0.64 | 5.70 | 0.53 | 4.39 | 0.41 | 6.57 | 0.61 | 4.30 | 0.40 | 5.30 | 0.49 | 9.50 | 0.89 | 3.43 | 0.32 | 6.07 | 0.57 | 6.02 | 0.56 |
| Mar | 16 | 11.8 | 8.03 | 0.68 | 8.19 | 0.69 | 6.40 | 0.54 | 5.60 | 0.47 | 6.09 | 0.52 | 5.10 | 0.43 | 8.30 | 0.70 | 5.91 | 0.50 | 7.12 | 0.60 | 8.30 | 0.65 | 6.96 | 0.59 |

Unité utilisée : heure et 10ème d'heure.

V.4.1.calcul des différents rayonnements (G, D, I) sur une surface horizontale :

Le tableau ci-dessous nous donne les valeurs de G, D et I en utilisant les équations (I.18), (I.19) et (I.20).

Tableau V.7: Valeurs de G, D et I pour une surface horizontale.

| Mois | Novembre | Décembre | Janvier | Février | Mars |
|------------------------|----------|----------|---------|---------|--------|
| G*(Wh/m ²) | 3524 | 2940 | 3314 | 4528 | 5952 |
| σ_{moy} | 0,50 | 0,44 | 0,49 | 0,56 | 0,59 |
| G (Wh/m ²) | 2466.8 | 1955.7 | 2300.6 | 3327.2 | 3327.2 |
| D (Wh/m ²) | 875,7 | 735,3 | 824,8 | 1111,3 | 1448,9 |
| I (Wh/m ²) | 1591,1 | 1220,4 | 1475,8 | 2215,9 | 3028,2 |

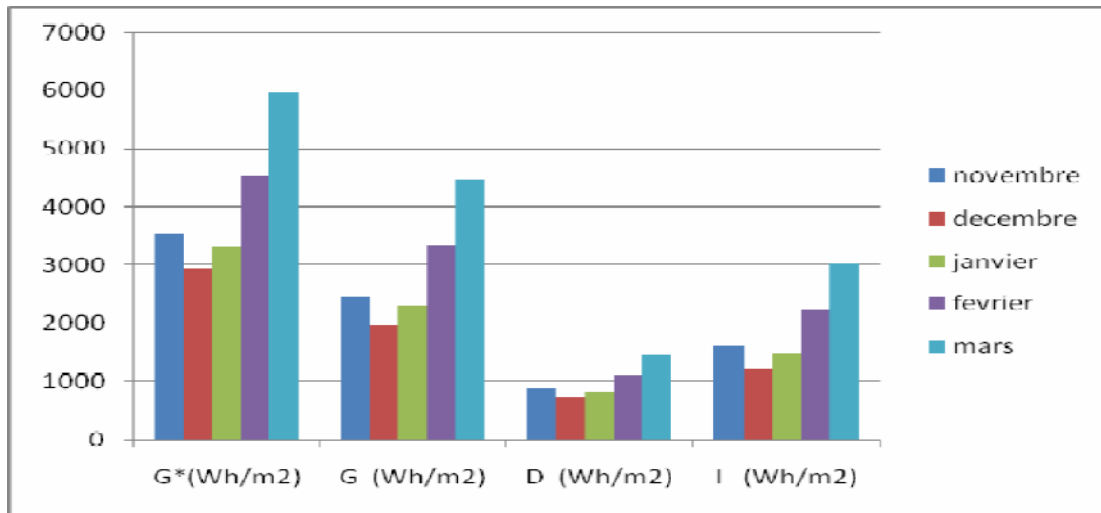


Fig. V.2 : Histogramme des rayonnements (G, D et I) reçus par une surface horizontale.

V.4.2.calcul des différents rayonnements (G, D, I) sur une surface inclinée:

Le tableau ci-dessous nous donne les valeurs de D, I et G en utilisant les équations (II.21) et (II.22), (II.23).

Tableau V.8: Valeurs de G, D et I, Φ pour une surface inclinée.

| Mois | NOV | DEC | JAN | FEV | MAR |
|--------------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|
| λ (30,0) | 1,63 | 1,88 | 1,73 | 1,50 | 1,25 |
| D (30,0) | 847,4 | 710 | 797,9 | 1078,1 | 1406,9 |
| I (30,0) | 2593,5 | 2294,3 | 2553,1 | 3323,8 | 3785,2 |
| G (30,0) | 3440,9 | 3004,3 | 3351 | 4401,9 | 5192,1 |
| SSo (h) | 10,1 | 9,6 | 9,8 | 10,7 | 11,8 |
| Φ (KWh/m ² .j) | 3,38 | 3,23 | 3,64 | 4,69 | 5,61 |

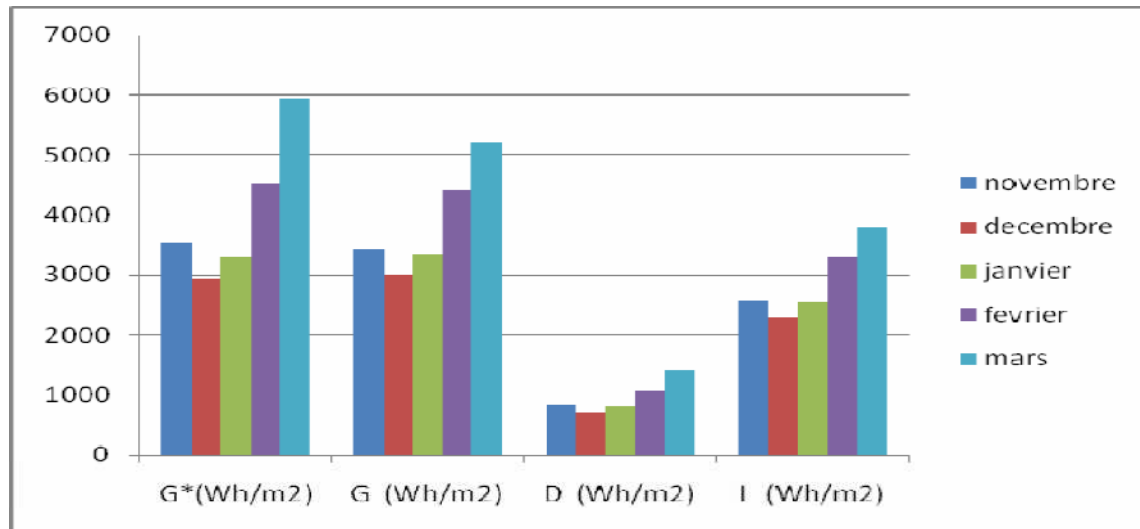


Fig. V.3: Histogramme des rayonnements (G, D, I) reçus par une surface inclinée de 30°

V.5.DIMENSIONNEMENT DE L'INSTALLATION POUR LE CHAUFFAGE DOMESTIQUE

Les systèmes solaires thermiques peuvent d'une part servir au **chauffage domestique**. Et d'autre part, peuvent également contribuer à chauffer l'eau sanitaire (souvent en association avec les chaudières existantes).

V.5.1.Choix du capteur : [26]

Il faut choisir le type de capteurs qui correspond le mieux au niveau de température auquel on désire travailler. Bien entendu plus le niveau de température est élevé, plus les technologies mises en œuvre sont évoluées et plus les coûts de production sont élevés.

Pour assurer la production du chauffage, on a choisi un capteur solaire plan de marque MEGASUN du model ST2000 car ce type fonctionne sous ensoleillement faible.



Fig. V.4: Vue principale d'un capteur solaire plan ST2000

V.5.2. Caractéristiques générales des capteurs solaires plans MEGASUN : [26]

Capteurs vitrés plans à construction robuste de nouvelle technologie, adaptés à tous les systèmes solaires à circulation forcée. Le mode et les matériaux de construction ont pour résultat une grande absorption des rayons solaires et un rendement en énergie thermique même par période de faible ensoleillement.

Les Capteurs Solaires MEGASUN existent en deux types, **ST-2000 (2,1 m²)** et **ST-2500 (2,61 m²)**, avec traitement sélectif en titane ou peinture noire.

Seuls ou combinés, ils couvrent tous les besoins des systèmes solaires.

➤ Caractéristiques techniques de base

- Châssis en aluminium anodisé, très endurant aux conditions climatiques extrêmes (forte humidité, régions côtières, etc...).
- Isolation postérieure et latérale très dense (20mm laine de verre et 40mm laine de roche) qui minimise les pertes thermiques, le rendant ainsi idéal pour des régions à basses températures saisonnières.
- Vitre solaire spéciale à micro prismes, très endurante aux chutes de grêles (solar tempered glass).
- Absorbeur en cuivre recouvert d'un traitement sélectif à base de titane, ou peinture noir. Sur demande, les kits peuvent être livrés sur palettes. Le capteur solaire avec traitement sélectif en titane est idéal pour des régions à rayonnement dispersé et basses températures, absorbant jusqu'à 16% de rayonnement en plus durant les mois d'hiver par rapport aux absorbeurs classiques noirs. Le traitement sélectif à base de titane n'est ni toxique ni polluant et maintient une stabilité de ses propriétés optiques et mécaniques même par de très faibles ou très fortes températures.

V.5.3. Dimensions des capteurs :

Tableau V.9 : caractéristiques du système capteur solaire plan MEGASUN [26]

| Type SÉLECTIF | Dimensions (m ²) | Surface Brute (m ²) | Surface Nette (m ²) | Poids (kg) | Capacité (L) | Pression d'essai (bar) | Pression max. de fonctionnement (bar) | Collecteur | |
|---------------|------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|------------|--------------|------------------------|---------------------------------------|------------|-------|
| | | | | | | | | a | e |
| ST-2000 | 2050x1010x90 | 2,10 | 1,8 | 43 | 1,67 | 10 | 7 | 95%±2% | 5%±3% |
| ST-2500 | 2050x1275x90 | 2,61 | 2,31 | 51 | 2,09 | 10 | 7 | | |

V.5.4. Rendement du capteur :

Il dépend de ces caractéristiques géométriques et les propriétés physiques des éléments le constituant, il dépend aussi de la température d'entrée et de sortie, du débit massique, des données climatiques propre au site, et enfin le rayonnement incident. Il est calculé par la formule (III.2) citée dans le chapitre III.

Le tableau suivant nous donne les valeurs du rendement pendant la saison de chauffe et les températures d'entrée et de sortie du fluide :

Tableau V.10 : Rendement du capteur solaire pendant la saison de chauffe

| Températures | $T_{mj} = T_a$ | T_p | $\frac{K}{G} * (T_p - T_a)$ | Rendements |
|--------------|----------------|-------|-----------------------------|------------|
| Nov | 14,52 | 30,57 | 0,0332 | 0,7468 |
| Déc | 11,76 | 27,1 | 0,0363 | 0,7437 |
| Jan | 09,16 | 25 | 0,0320 | 0,748 |
| Fév | 10,97 | 25,75 | 0,0238 | 0,7562 |
| Mars | 13,66 | 28,9 | 0,208 | 0,7592 |

A partir du tableau, on en déduit que le rendement moyen est égal à 75%.

V.5.5.Surface de captation : [15]

➤ Détermination de la surface de captage nécessaire pour le chauffage :

La surface de captage définie comme étant le rapport d'une part du besoin énergétique journalier exprimé en KWh et d'autre part de l'énergie reçue pendant la journée exprimée en KWh/m²J et le rendement du capteur :

$$S_c = \frac{Q_{tot}}{\eta * \Phi * 30 \text{ jours}} = \frac{8361.50}{0,75 * 20,55 * 30} = 18.08 \text{ m}^2$$

D'où la surface de captage pour le chauffage est égale à **18.08 m²**

V.5.6.Nombre de capteurs utilisés :

$$N = \frac{S_t}{S} = \frac{18.08}{2.1} = 9 \text{ capteurs}$$

La correction de la surface totale du captage sera : $S_t = S * N = 2,1 * 9 = 18.9 \text{ m}^2$

V.6.DETERMINATION DES CARACTERISTIQUES DE LA POMPE

Pour déterminer les caractéristiques de la pompe à savoir sa hauteur manométrique et sa puissance utile on a besoin de calculer les pertes de charge dans la spirale et la tuyauterie de raccordement.

Le tuyau en caoutchouc sous la dalle chauffante a une forme spirale comme représenté sur la figure :

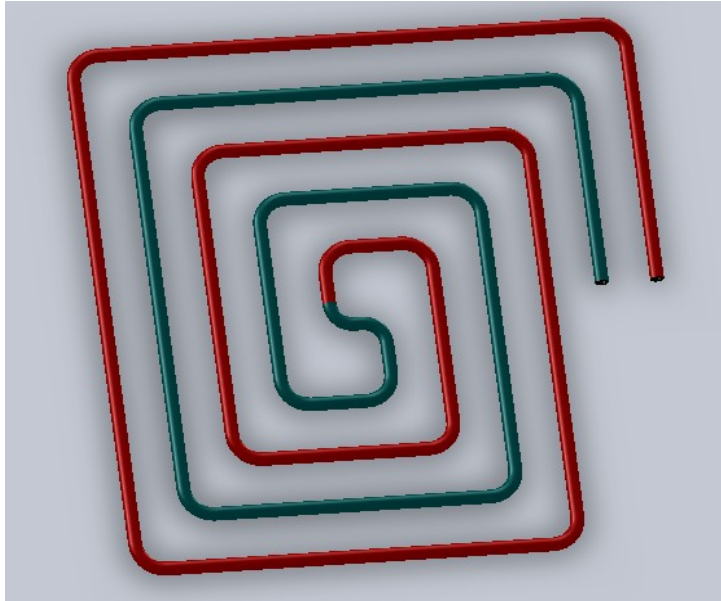


Fig. V.5: tuyau en caoutchouc sous la dalle chauffante de forme spirale

V .6.1.Calcul des pertes de charge linéaires dans la spirale :

La perte de charge linéaire dans la spirale est donnée par l'équation (III.24) exprimée en pression qui devient :

$$\Delta P_L = \frac{\lambda}{D} * \frac{\rho_e * u^2}{2} * L_c$$

ΔP_L : Perte de charge linéaire en (pascal) ;

λ : Coefficient de perte de charge ;

ρ_e : Masse volumique de l'eau en (Kg /m³) ;

u : Vitesse d'écoulement de l'eau en (m/s) ;

D : Diamètre interne de la conduite en (m) ;

L_c : Longueur de la conduite en (mm) et elle est égale à 360000 (mm).

V .6.2.Calcul du nombre de Reynolds :

Par utilisation de l'équation (III .25) on aura :

$$R_e = 1000 * \frac{u * D}{\nu}$$

u : Vitesse de l'écoulement en (m/s) ;

D : Diamètre interne du tuyau en (mm) qui est égale à 16 (mm) ;

V : Viscosité cinématique de l'eau (mm²/s).

➤ **Calcul de la vitesse d'écoulement**

$$u = \frac{4 \cdot \dot{m}_e}{\rho_e \cdot D} = \frac{4 \cdot 0.129}{1000 \cdot 3.14 \cdot (16 \cdot 0.001)^2} = 0.64 \text{ (m/s)}$$

$$\text{Donc : } R_e = 1000 \cdot \frac{0.64 \cdot 16}{0.556} = 18417.26$$

On trouve le nombre de Reynolds $Re > 2000$ donc le régime est turbulent d'où l'utilisation de la formule de **Colebrook** ou le diagramme de **Moody** pour déterminer le coefficient de perte de charge linéaire et pour cela on a besoin de connaître la rugosité relative du tuyau qui est donnée par :

$$\frac{\varepsilon}{D} = \frac{0.085}{16} = 0.0053$$

Par utilisation du diagramme de Moody on aura : $\lambda = 0.04$

A.N : pertes de charge linéaire

$$\Delta P_L = \frac{0.04}{16} \cdot \frac{1000 \cdot (0.64)^2}{2} \cdot 360000 = 184320 \text{ Pa}$$

A.N :

V .6.3. Calcul des pertes charges singulière :

➤ **Les pertes de charges liées aux coudes**

Par utilisation de l'équation (III.28) on aura :

$$\Delta P_{s1} = \zeta_{rb} \frac{\rho \cdot u^2}{2} \cdot N \quad \text{telle que } N \text{ est le nombre de coudes dans le tube sous forme spirale.}$$

$$\text{D'où : } \Delta P_{s1} = 0.04 \cdot \frac{1000 \cdot (0.64)^2}{2} \cdot 150 = 1228.8 \text{ Pa}$$

➤ **Les pertes de charges liées au changement de sections brusque :**

Ces pertes de charge sont provoquées par les vannes les distributeurs et collecteurs et le ballon de stockage on va considérer un coefficient de perte de charge moyen ζ_{moy} et n le nombre de pertes de charges et la relation qui donne les pertes de charges singulière liées au changement brusque de sections est l'équation (II.28) exprimée en pression :

$$\Delta P_{s2} = \zeta_{moy} \frac{\rho \cdot u^2}{2} \cdot n = \Delta P_{s2} = 0.5 \cdot \frac{1000 \cdot (0.64)^2}{2} \cdot 20 = 2048 \text{ Pa}$$

Et les pertes de charges totales sont données par la relation suivante :

$$\Delta P = \Delta P_{s2} + \Delta P_{s1} + \Delta P_L = 2048 + 1228.8 + 184320$$

$$\Delta P = 187596.8 \text{ Pa}$$

Une fois que les pertes de charges dans le réseau, connus on a qu'à les multiplier par le débit volumique pour connaître la puissance utile de la pompe donc :

$$P_u = \frac{\dot{m}_e \cdot \Delta P}{\rho_e} = \frac{0.129 \cdot 187596.8}{1000} = 24.2 \text{ Watt}$$

P_u : Puissance utile de la pompe ;

ΔP : Pertes de charge totales ;

\dot{m}_e : Le débit massique de l'eau qui circule dans l'installation ;

ρ_e : Masse volumique de l'eau.

La puissance fournie à la pompe est donnée par la formule suivante :

$$\text{Si on prend } \eta = 65\% \quad P_f = \frac{P_u}{\eta} = \frac{24.2}{0.65} \approx 40 \text{ Watt}$$

Après une recherche sur Internet on a pu choisir une pompe de circulation (BOSCH) qui a les caractéristiques attendues.

P_f : La puissance fournie à la pompe ;

P_u : Puissance utile de la pompe ;

η : Rendement de la pompe qui est environ égale à 65%.

V.7.BALLON STOCKAGE

Etudier un système de chauffage solaire d'une maison par dalle chauffante nous a conduit à dimensionner notre système pour des situations maximales et ainsi de trouver qu'il nous faut neuf capteurs solaires thermiques plans simple vitrage pour assurer le chauffage dans ces conditions, mais en une année il n'y a pas que ces conditions maximales, il y a aussi des journées où la température externe égale pas zéro degré mais 5°C ou 10°C alors notre besoin en chauffage est inférieur au flux de chaleur absorbé dans les capteurs solaires, donc on aura un surplus d'énergie.

Alors la question qu'on se pose c'est, que doit-on faire de ce surplus d'énergies ? Doit-on la stocker dans un corps qui a une capacité calorifique élevée pour ensuite la transmettre à la dalle chauffante ? Mais cette dernière elle-même constitue un grand réservoir à capacité

thermique élevée donc on va la stocker dans un ballon de stockage rempli d'eau pour ensuite l'utiliser dans la salle de bain et la cuisine dans le cas de non besoin de l'eau chaude. Le ballon de stockage peut servir pour le stockage de la chaleur en plus de la dalle chauffante.

V.7.1. Le surplus d'énergie quand on a des déperditions inférieures aux déperditions maximales :

Soit les déperditions $D = n\% D_{\max}$

Donc :

$$SE = \frac{100-n}{100} * D_{\max}$$

SE : surplus d'énergies ;

D_{\max} : déperditions maximales ;

n : pourcentage des déperditions par rapport aux déperditions max.

V.10.2. Débit massique d'eau chauffée par le surplus d'énergie :

Par utilisation de l'équation (II.12) on aura :

$$\dot{m} = \frac{SE}{C_{pe} * \Delta T}$$

\dot{m} : Débit massique d'eau chauffée par le surplus d'énergie ;

ΔT : la différence de température entre l'eau de la citerne et l'eau du ballon ;

SE : surplus d'énergie ;

C_{pe} : capacité calorifique massique de l'eau.

Prenons le cas le plus fréquent à savoir le surplus d'énergie est égale à 50% des déperditions maximales et la différence de température entre l'eau de la citerne et l'eau du ballon est égale à 30°C.

Donc nous aurons un débit massique d'eau chauffée par le surplus d'énergie égale à :

$$\dot{m} = \frac{SE}{C_{pe} * \Delta T} = \frac{0.5 * 5394.53}{4185 * 30} = 0.0215 \text{ (Kg/s)}$$

Pour trouver le volume du ballon de stockage on doit multiplier le débit massique par le temps d'expositions des panneaux solaires vers le soleil qui est environ 8 heures et de diviser par la masse volumique de l'eau donc :

$$V_b = \frac{\dot{m} \cdot t}{\rho_e} = \frac{0.0215 \cdot 8 \cdot 3600}{1000} = 0.6192 \text{ m}^3 = 619.2 \text{ L}$$

Donc notre ballon de stockage doit avoir un volume de 619.2L mais on n'a pas trouvé de ballon avec ce volume dans le site de MEGASUN c'est pour cette raison qu'on va prendre un ballon de 500L car c'est le plus proche volume qu'on peut trouver en vente par MEGASUN.

- **Caractéristiques du ballon de stockage de 500L MEGASUN avec un échangeur**

Tableau V.11 : Caractéristiques du ballon de stockage de 500L MEGASUN [26]

MEGASUN BALLONS DE STOCKAGE D'EAU CHAUDE

Ballons Megasun type VS - BL1, avec un échangeur

| Modèle | | V - 420/ BL1 | | | | V - 500/ BL1 | | | |
|------------------------------|-------------------|--------------|------|------|------|--------------|------|------|------|
| Capacité | lt | 420 | | | | 500 | | | |
| Surface d'échange | m ² | 1.5 | | | | 2.2 | | | |
| Capacité de l'échangeur | lt | 7.6 | | | | 11.5 | | | |
| Débit primaire | m ³ /h | 3 | | | | 3 | | | |
| Chute de pression | mbar | 155 | | | | 220 | | | |
| Température entrée primaire | °C | 55 | 70 | 80 | 90 | 55 | 70 | 80 | 90 |
| Puissance échangeur (1) | kW | 14.2 | 27.5 | 36.6 | 46.4 | 16.7 | 32.2 | 42.8 | 54.2 |
| Débit continu | lt/h | 350 | 675 | 900 | 1150 | 410 | 790 | 1050 | 1330 |
| Consommation quotidienne (2) | kWh/24H | 2.4 | | | | 2.68 | | | |
| Poids à vide | kg | 140 | | | | 170 | | | |

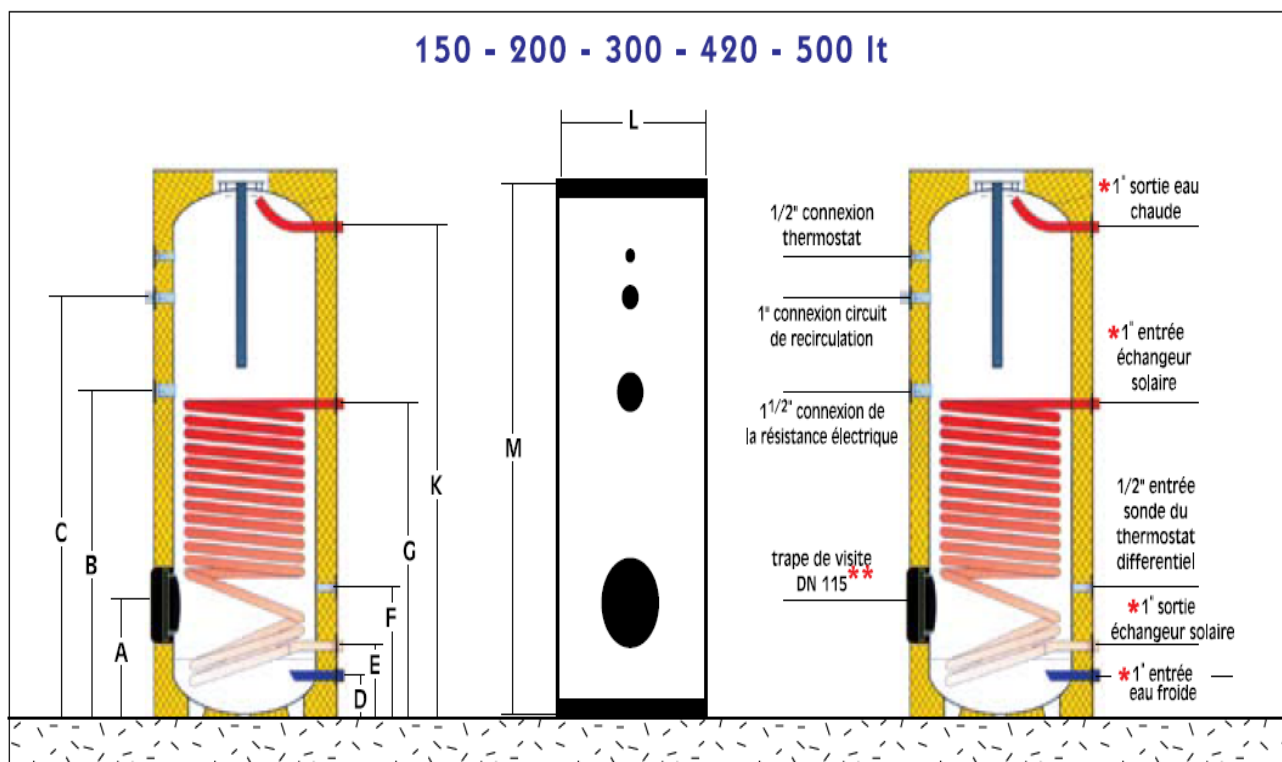
(1) Température eau froide 10 °C, Température sortie ecs 45 °C. Température de stockage 60 °C.

(2) Température ecs stockée 65 °C - Température ambiante 20 °C



Fig. V.6 : Ballon de stockage MEGASUN [26]

➤ Dimension et connexion hydraulique du ballon de stockage



*Pour les ballons 420 lt. et 500 lt. sont 1^{1/4} " (au lieu de 1") ** Sur demande DN 200

Fig. V.7: Ballon MEGASUN type VS BL-1, avec un échangeur [26]

Tableau V.12: Dimension du ballon de stockage MEGASUN [26]

| TYPE BALLON | A | B | C | D | E | F | G | K | L | M |
|---------------|-----|------|------|-----|-----|-----|------|------|-----|------|
| V - 150 / BL1 | - | 670 | 685 | 170 | 270 | 300 | 610 | 795 | 603 | 1050 |
| V - 200 / BL1 | - | 860 | 1010 | 170 | 270 | 480 | 830 | 1250 | 603 | 1400 |
| V - 300 / BL1 | 410 | 1055 | 1455 | 170 | 270 | 480 | 995 | 1770 | 603 | 1930 |
| V - 420 / BL1 | 410 | 920 | 1255 | 170 | 270 | 480 | 870 | 1520 | 730 | 1730 |
| V - 500 / BL1 | 410 | 1165 | 1505 | 170 | 270 | 480 | 1135 | 1770 | 730 | 1970 |

Les ballons 150 et 200 sont livrés sans trape de visite latérale

V.8.CHOIX DE LA POMPE A CHALEUR

On peut choisir la pompe à chaleur comme système de chauffage d'appoint pour plusieurs raisons que voici :

- ❖ Son efficacité énergétique donc son faible coût de consommation.
- ❖ Pour qu'une pompe à chaleur fonctionne à un degré d'efficacité élevée elle doit être limitée en température haute et basse, la température haute est d'environ 60°C à 70°C ce qui convient au chauffage basse température.

- ❖ La température du milieu extérieur de TIZI OUZOU est généralement au dessus de 0°C ce qui convient à une pompe à chaleur.
- ❖ La possibilité d'inverser le cycle et profiter de la zone froide pour améliorer le temps de réponse de la dalle qui est très lent à cause de sa très forte capacité thermique.
- ❖ Fonctionnement du plancher en mode rafraichissant dans les périodes chaudes.
- ❖ Elle est plus écologique que les chaudières à gaz même si elle utilise de l'électricité issue du gaz car leur coefficient de performance est supérieur à l'inverse du rendement d'une centrale électrique qui marche au gaz.

V.9.CHOIX DU CHAUFFAGE AU GAZ :

On peut choisir le chauffage au gaz comme chauffage d'appoint pour les raisons suivantes :

- ❖ La disponibilité du gaz dans notre pays.
- ❖ Le cout du KWh est très réduit en comparaison avec les autres énergies.

V.10.DIMENSIONNEMENT DE LA POMPE A CHALEUR ET DE LA CHAUDIERE A GAZ :

La puissance fournie par la pompe à chaleur est trouvée en additionnant la puissance maximale à fournir pour le chauffage de la maison et la puissance nécessaire pour chauffer 500 L d'eau par 48 heures de 0°C à 60°C.

Pour la puissance maximale à fournir pour le chauffage de la maison on a trouvé une valeur de 5394.53 W donc il nous reste plus qu'à déterminer la puissance pour le chauffage de l'eau et elle est donnée par utilisation de l'équation (II.12) :

$$P_{fe} = C_{pe} * \dot{M} * \Delta T = 4185 * \frac{0.5 * 1000}{48 * 3600} * 60 = 726.56 \text{ Watt}$$

$$\text{Avec: } \dot{M} = \frac{\rho_e * V}{48 * 3600} \text{ qui représente la masse d'eau consommé en 48 heures (2 jours)}$$

$$P_{pac} = 5394.53 + 726.56 = 6121.1 \text{ Watt}$$

Donc on va prendre une pompe à chaleur qui fournie 6000 Watt.

Après une recherche sur le net on a trouvé une pompe à chaleur qui fournie cette puissance il s'agit de la pompe à chaleur ATLANTIC ALFEA EVOLUTION.



Fig. V.8: Pompe à chaleur ATLANTIC ALFEA EVOLUTION [27]



Fig. V.9 : chaudière micro-accumulation [28]

V.10 .Régulation du chauffage

La régulation d'un chauffage solaire d'une maison par dalle chauffante n'est pas une mince affaire à cause de l'inertie de la dalle qui est très grande et qui a un temps de réponse très long ,avec une bonne régulation on peut réduire ce temps ,il faut envisager un système de régulation automatique pour cela on a besoin d'installer des capteurs de température dans la dalle, l'air de la maison , la sortie du capteur solaire et le ballon de stockage on a besoin aussi d'installer des électrovannes et un calculateur.

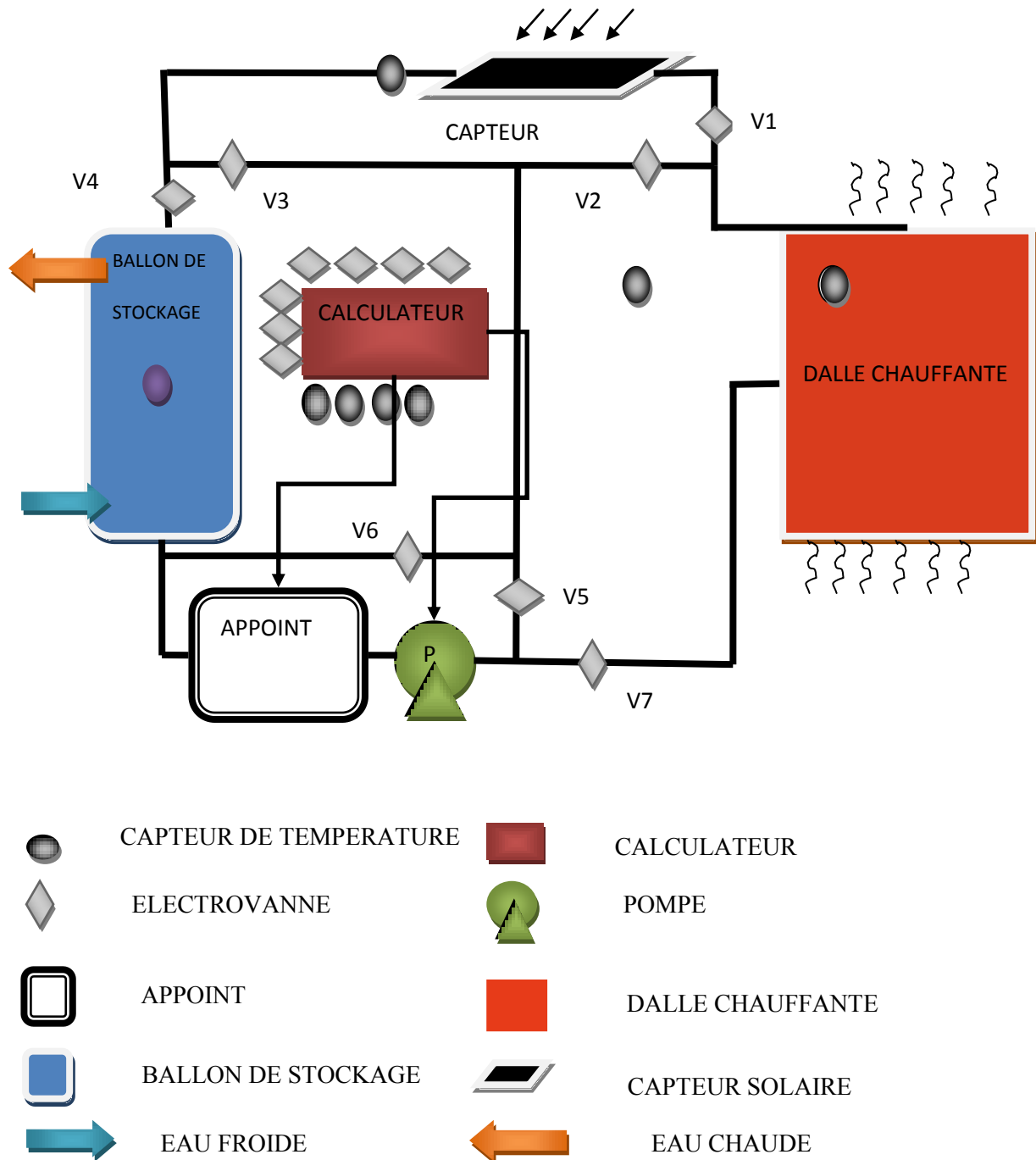


Fig. V.10: Schéma de principe de la régulation

➤ **Explication du fonctionnement de l'installation**

Notre installation peut fonctionner selon plusieurs chemins que voici :

- Chauffage de la dalle chauffante avec les panneaux solaires :

Lorsque le besoin en chauffage est égale au flux de chaleur capté par les panneaux solaires, les capteurs de température vont envoyer un signal au calculateur celui-ci va traiter ces

informations et va générer un autre signal qui ouvrira les électrovannes V1 V3 V6 V7 et qui fermera les électrovannes V2 V4 V5 et qui allumera la pompe et éteindra la pompe à chaleur.

Lorsque le besoin en chauffage est supérieur au flux de chaleur capté par les panneaux solaires et que de la chaleur n'est pas stockée dans le ballon de stockage, les capteurs de température vont envoyer un signal au calculateur celui-ci va traiter ces informations et va générer un autre signal qui ouvrira les électrovannes V1 V3 V6 V7 et qui fermera les électrovannes V2 V4 V5 et qui allumera la pompe et la pompe à chaleur pour chauffer le fluide caloporteur.

Lorsque le besoin en chauffage est inférieur au flux de chaleur capté par les panneaux solaires, les capteurs de température vont envoyer un signal au calculateur celui-ci va traiter ces informations et va générer un autre signal qui ouvrira les électrovannes V1 V4 V7 et qui fermera les électrovannes V2 V3 V5 V6 et qui allumera la pompe et éteindra la pompe à chaleur ce qui va avoir comme conséquence le chauffage de l'eau contenue dans le ballon de stockage.

- Chauffage de la dalle par le ballon de stockage :

Lorsque le besoin en chauffage est supérieur au flux de chaleur capté par les panneaux solaires, et que de la chaleur est stocké dans le ballon de stockage, les capteurs de température vont envoyer un signal au calculateur celui-ci va traiter ces informations et va générer un autre signal qui ouvrira les électrovannes V2 V3 V4 V7 et fermera les électrovannes V1 V5 V6 et allumera la pompe et fermera la pompe à chaleur.

- Chauffage ou refroidissement de la dalle par la pompe à chaleur :

Dans ces deux scénarios c'est les capteurs de température encore une fois qui vont envoyer un signal au calculateur celui-ci va traiter ces informations et va générer un autre signal qui ouvrira les électrovannes V2 V6 V7 et fermera les vannes V1 V3 V4 V5 et allumera la pompe et la pompe à chaleur pour chauffer ou refroidir le fluide caloporteur.

- Chauffage de l'eau du ballon de stockage par les capteurs solaires :

Lorsque le besoin en chauffage est nul les capteurs de température vont transmettre ça sous forme de signal au calculateur qui va traiter ces informations et va générer un autre signal qui ouvrira les électrovannes V1 V2 V4 V5 et fermera les électrovannes V3 V6 V7 et allumera la pompe et éteindra la pompe à chaleur.

V.11.ETUDE ECONOMIQUE

Comme tout projet d'investissement, l'investissement en énergie renouvelable n'échappent pas à la règle de rentabilité financière, car même si il est vrais que le chauffage au moyen des capteurs solaire est techniquement réalisable, propre non polluant, disponible et durable, le coté économique est certainement le plus indicatif chez les ménages, d'ou tout l'intérêt est d'évaluer le prix du KWh solaire et le comparer avec le KWh des énergies traditionnelles disponible sur le marcher, à savoir le gaz naturelle, l'électricité, fioul et le gaz butane.

V.11.1.Le KWh solaire

➤ Coût de l'installation solaire [29]

Coût du chauffage solaire :

- 9 Capteurs plan de types ST2000 : 720 000DA
- Un réservoir de stockage de 500 L : 80 000DA

Coût totale du chauffage solaire vaut : 800 000DA.

Le coût de l'installation solaire : 800 000 DA

➤ Evaluation du prix de revient du kWh de l'installation étudiée [30]

Le coût de l'installation est évalué à 800 000DA, et le fond national de maîtrise de l'énergie (FNME) offre une subvention de 45% du prix de revient, ce qui conduit à un coût d'investissement de 440 000DA.

Tenant compte de la durée de vie de l'installation qui est en moyenne de 20 ans et la production d'énergie annuelle, le prix du kilowattheure solaire vaut :

$$1\text{kWh vaut } \frac{\text{cout de l'investissement}}{\text{le nombre de KWh par 20 ans}} = \frac{440000}{8361.5 \cdot 20} = 2.63 \text{ DA}$$

V.11.2.Les énergies traditionnelles :

La consommation mensuelle est de 1672.3 KWh

V.11.2.1.Gaz naturel: [31]

On a: 1th=1.16 KWh.

Donc la: Consommation totale de l'installation en thermie est de 1441.638 th/mois

Tableau V.13.a : La consommation et prix de consommation

| 1 ^{er} tranche | | 2 ^{eme} tranche | | DA |
|-------------------------|--------------------|--------------------------|--------------------|--------|
| Consommation (th) | Prix unitaire (DA) | Consommation (th) | Prix unitaire (DA) | |
| 375 | 0.168 | 1066.64 | 0.324 | 408.59 |
| TVA (taux 7%) | | | | 28.60 |
| Prime fixe par mois | | | | 28.5 |
| Total à payer | | | | 465.69 |
| Prix du KWh | | | | 0.28 |

V.11.2.2.Electricité : [31]**Tableau V.13.b : La consommation et prix de consommation**

| 1 ^{er} tranche | | 2 ^{eme} tranche | | DA |
|-------------------------|--------------------|--------------------------|--------------------|---------|
| Consommation (KWh) | Prix unitaire (DA) | Consommation (KWh) | Prix unitaire (DA) | |
| 41.6 | 1.779 | 1630.7 | 4.179 | 6888.70 |
| TVA (taux 7%) | | | | 482.21 |
| Prime fixe par mois | | | | 43.70 |
| Total à payer | | | | 7414.61 |
| Prix du KWh | | | | 4.43 |

V.11.2.3.Gaz butane :

Le gaz butane est vendus sur le marcher sous forme de bouteille contenant 13kg de butane, dont le prix est de 230 da la bouteille.

On a : 1kg de butane fournie environ 13.72 kWh

Masse de butane pour les besoin de l'habitat: 230,14 kg.

Nombre de bouteille pour les besoin de l'habitat : 18.

Prix total de consommation : 4140 DA.

Prix du kWh : **1,31 DA.**

V.11.2.4.Fioul (mazoute):

Le prix d'un litre de mazout est de : 13,5 DA.

Un litre (1L) de mazoute produit environ : 10.4 kWh.

Quantité de mazoute pour les besoin de l'habitat : 303,61 L

Prix total de consommation : 4098,83 DA.

Prix du kWh : **1,30 DA.**

V.12.CONCLUSION :

Ce chapitre a permis le calcul de la surface de captage et procédé au choix du capteur dont les caractéristiques dimensionnelles sont fournies par le constructeur et le bon choix et des autres éléments constituant le système. Nous avons aussi établi une équation qui nous a permis de connaître le temps du régime transitoire de la dalle chauffante.

D'après les résultats obtenus dans l'évaluation des prix du KWh des différentes sources d'énergies, le prix du KWh solaire est relativement cher devant le gaz naturel, butane et le mazout, et relativement bas devant l'électricité.

Le travail que nous avons effectué nous a permis de comprendre les besoins des humains en chauffage et de s'intéresser à la description des différentes techniques de chauffage que l'homme a utilisé et continu à utiliser pour ensuite se focaliser sur le chauffage solaire qui a l'avantage d'être propre et durable.

Un bilan thermique a été établi à travers le calcul des différents déperditions par transmission et par renouvellement d'air et nous avons remarqué que les déperditions par transmission sont supérieures aux déperditions par renouvellement d'air et ce résultat est approuvé par l'expérience et en plus que la puissance de chauffage est très élevée pour cela nous proposons d'augmenter la résistance thermique de l'enveloppe de la maison à travers l'utilisation d'une bonne isolation thermique et des doubles vitrages pour les fenêtres et améliorer l'étanchéité de la maison.

Les dalles chauffantes offrent une température douce et uniforme dans toute la maison, elle joue un double rôle de stockage et d'émetteur de chaleur. Leurs capacité thermique élevée est un avantage et un inconvénient ; un avantage car elle permet de stocker la chaleur très longtemps et un inconvénient quant on veut avoir des différences de température rapides.

L'utilisation d'une pompe à chaleur comme chauffage d'appoint dans une installation de chauffage solaire a de nombreux avantages, elle est économique et le plus important elle est écologique en plus de ça c'est une technologie en perpétuel progrès, donc nous pensons que la pompe à chaleur est un dispositif d'appoint plus adéquat que le gaz de ville pour les régions pas trop froides bien sûr.

Nous recommandons de faire une étude économique sur l'utilisation des isolants thermiques qui existent en abondance dans notre pays comme le liège, à cet effet, une exploitation massive de ce secteur (industrie du liège) est envisageable afin de subvenir à la demande de l'isolation thermique des maisons.

Ce travail nous a aussi permis de nous rendre compte et de savoir à quelle point la nature est généreuse et de découvrir ainsi qu'il y a des solutions pour subvenir au besoins en énergie des êtres humains sans détruire la nature car la destruction de cette dernière est synonyme de l'extinction de la race humaine, donc l'utilisation des rayonnements solaires pour le chauffage des maisons constitue un excellent moyen de lutte contre le réchauffement climatique et de préserver ainsi notre planète sans compromettre l'environnement des générations avenir.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] : J. BERNARD, *Energie solaire Calculs et optimisation*, Edition ellipses, 2004.
- [2] :K.MAHDI, *Conception et réalisation d'un concentrateur sphérique*, Mémoire magister, université de Constantine, Mars 2008.
- [3] : C.P.de BRICHAUMBOT et C.VAUGE, *Le gisement solaire*, Ed. Tech. & Doc, Paris, 1982.
- [6]:ADEME (Agence de l'Environnement et de la Maitrise de l'Energie), N°5622, Mars 2008.
- [8] : Thomas LETZ. INES Education-Savoie Technologie- BP258-F73375 Le Bourget du lac- Novembre 2007.
- [9] : Yves JANNOT, *Transferts Thermiques*, Ecole des Mines Nancy, 2011.
- [10]: Incropera, F.P., De Witt, D.P.' *Introduction to Heat Transfer*', 1990, 2nd Ed, John Wiley & sons.
- [11] : Documentation Technique Réglementaire (DTR).
- [12] : P.Amet, G.Goudron, Y.Guern et R.Jules, E.Marguet et F.Mykieta, *Installer un chauffage ou un chauffe-eau solaire* ; Edition EYROLLES, Octobre 2010.
- [13] : André JOFFRE, *Energie solaire thermique dans le bâtiment*, Ed.Tecsol, 2012.
- [15]:Anissa SALMI, *Calcul et dimensionnement d'une installation de chauffage et production d'eau chaude sanitaire par énergie solaire d'une maison individuelle type pavillon*, Mémoire d'ingénieur UMMTO 2007.
- [16] : Jean-François LAPRAY, *Pompes centrifuges, hélico-centrifuges et axiales*, Techniques de l'ingénieur, Novembre 1994.
- [17] : BOULKAMH Mourad, *CONTRIBUTION A L'ETUDE, LA SIMULATION ET L'ANALYSE DES POMPES A CHALEUR ASSISTEES PAR L'ENERGIE SOLAIRE*, Mémoire magister, université de Constantine, Août 2008.
- [19] : SELLAM Fouad, *HYDRAULIQUE GENERALE*, Cours, Institut National d'Agronomie, Février 2010.
- [21] : NF DTU 65.14 P2 (septembre 2006 indice de classement : P 52-307-2) : *Travaux de bâtiment – Exécution des planchers chauffants a eau chaude*.
- [22]: Siemens Building Technologies HVAC Product, Février 2002.
- [23]: Documentation Technique Réglementaire (DTR).
- [24] : Centre météorologique de Tizi-Ouzou.
- [25] : Michel CAPDROU, *l'atlas solaire algérien*. École polytechnique d'architecture et d'urbanisme, OPU, 1985.
- [30] : l'Agence nationale pour la promotion et la rationalisation de l'utilisation de l'énergie « **APRUE** ».
- [31] : Commission de Régulation de l'Electricité et du gaz « **CREG** ».

WEBOGRAPHIE (consultés en Mars 2012)

[Site 1], [4]: <http://www.promes.cnrs.fr/MOYENS/Station/pyranometre.htm>

[Site 2], [5]: <http://www.promes.cnrs.fr/MOYENS/Station/pyrheliometre.htm>

[Site 3], [7] : <http://www.clipsol.com/navig/indiv/contenu/produit/PSD.html>

[Site 4], [14] : <http://www.ines-solaire.com/>

[Site 5], [18] : <http://www.climamaison.com/chaudiere-condensation-gaz.php?Doss=15#>

[Site 6], [20] : <http://www.thermexcel.com/french/program/fluide1.htm>

[Site 7], [26] : <http://www.helioakmi.com/>

[Site 8], [27] : <http://www.domotelec.fr/achat/pompe-a-chaleur-air-eau/381-aerothermie.html>

[Site 9], [28] : <http://www.electrogaz.fr/chaudieres.php>

[Site 10], [29] : <http://www.helioakmi.com/>