

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



Département de Génie Mécanique

Projet de Fin d'Etudes

Pour l'obtention du diplôme

D'Ingénieur d'Etat en Génie Mécanique

**Mise en place de systèmes passifs contribuant à
une meilleure régulation thermique d'un
bâtiment**

Proposé et dirigé par :
Dr. BENKOUSSAS Bouzid

Présenté par :
BOUREGA Ryad

Promotion Juin 2010

ملخص:

يتمثل هذا المشروع في وضع أنظمة سالبية من أجل تعديل درجة الحرارة في المنشآت العمرانية أي وضع نظام يقوم بتعديل درجة الحرارة باستعمال طاقة متجددة أو اقل استهلاك للطاقة

الكلمات المفتاحية : نظام سالب، تعديل درجة الحرارة.

Résumé :

Ce projet consiste à placer des systèmes passifs contribuant à une meilleure régulation thermique d'un bâtiment c'est-à-dire l'implantation d'un système pour la régulation de la température par l'utilisation des énergies renouvelable ou à basse consommation d'énergie.

Mots clés : système passif, régulation thermique.

Abstract :

This project consists in placing passive systems to contribute to better thermal regulation of a building, i.e., the establishment of a system for temperature control by the renewable use of energies or low consumption energy systems.

Key words: passive system, thermal regulation.

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail

*A ma très chère **Mère** et mon très cher **Père***

A ceux qui m'ont toujours encouragé pour que je réussisse dans mes études

A ceux qui ont veillé pour mon bien être

A ceux qui m'ont soutenu dans les moments les plus difficiles de ma vie

A ceux que j'aime et je respecte infiniment

Le jour est venu pour leur dire Merci...

Ainsi qu'à mes chers frères Mohamed, Hamza et Younes et Bassem

Et ma chère sœur Asma et son époux et son petit fils Abd El. Ali

A mes grandes mères, tous mes oncles et toutes mes tantes.

A toute la famille BOUREGA et BOURENANE.

A tous mes amis qui ont toujours été présents et qui n'ont ménagé aucun effort pour me bénéficier avec leur aide et leurs suggestions, en

particulier Ahmed, El hadj, Yassine, Oussama

A tous mes camarades du Département de génie Mécanique.

Ryad

Remerciement

Tout d'abord, je remercie le bon Dieu de m'avoir donné l'opportunité pour achever mes études supérieures.

*J'adresse mes vifs remerciements à mon professeur consultant **DR Benkoussas** pour m'avoir diligenté tout au long de ce travail, pour sa compréhension, sa patience, sa compétence, et ces remarques qui m'ont été précieuses,*

Je tiens à remercier tous les enseignants de l'Ecole Nationale Polytechnique qui ont participé à ma formation, m'ont beaucoup appris et sans lesquels je ne serais pas ce que je suis.

Je remercie enfin tous mes amis ainsi que tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce travail.

Table des matières

INTRODUCTION GENERALE	1
Chapitre I : GENERALITES	5
1.1 L'énergétique du bâtiment	5
1.1.1 Le bâtiment devrait être confortable	5
1.1.2 Applications de l'énergétique du bâtiment.....	5
1.2 Rappels de physique du bâtiment.....	6
1.2.1 Capacité thermique.....	6
1.2.2 Modes de transfert de chaleur	6
1.3 Les besoins de l'occupant.....	7
1.3.1 Confort.....	7
1.3.2 Aération	9
Chapitre II : BILAN ENERGETIQUE D'UNE HABITATION	10
2.1 Matériaux d'isolation.....	11
2.1.1 Conductivité thermique	11
2.1.2 Isolants et conducteurs de la chaleur	12
2.2 Transmission thermique	12
2.2.1 Éléments plans formés de couches.....	12
2.2.2 Ponts thermiques	15
2.2.3 Transmission thermique des fenêtres	16
2.3 Bilan énergétique du bâtiment.....	18
2.3.1 Bilan énergétique	18
2.3.2 Déperditions par transmission.....	22
2.3.3 Apports d'énergie solaire et gains internes	24
Chapitre III : CALCUL ENERGETIQUE « Résultats et Interprétation »	30
3.1 Introduction	30
3.2 Les données de base de la maisonnette	30
3.2.1 Spécificités du site.....	30
3.3 Interprétation des résultats.....	52
3.4 Conclusion.....	52
Chapitre IV : LES SYSTEMES PASSIFS	53
4.1 Installations héliothermiques	53
4.1.1 Le rayonnement solaire.....	53
4.1.2 Les capteurs héliothermiques	53

4.1.3 Installations thermosolaires	55
4.1.4 Murs capteurs	56
4.2 Refroidissement et climatisation à basse consommation d'énergie	61
4.2.1 Parois climatiques	61
4.2.2 Mur Trombe	63
4.3 Les puits canadiens/provençaux.....	64
Chapitre V : DIMENSIONNEMENT DES SYSTEMES PASSIFS	68
5.1 Introduction.....	68
5.2 Dimensionnement et mise en œuvre du puits canadien	68
5.2.1 Entrée d'air neuf.....	68
5.2.2 Conduit.....	69
5.2.3 Système d'évacuation des condensats	71
5.2.4 Ventilateur et système de régulation.....	73
5.3 Dimensionnement de l'installation.....	73
5.3.1 Calcul de débit volumique de soufflage de chaque pièce	73
5.3.2 Calcul des dimensions des conduits de distribution de l'air.....	75
5.3.3 Choix des vitesses de l'air.....	76
5.3.4 Choix de dimension de la conduite d'aspiration	76
5.3.5 Choix du ventilateur	76
5.4 Dimensionnement du mur trombe	84
5.5 Conclusion	86
CONCLUSION GENERALE.....	87
BIBLIOGRAPHIE.....	88
ANNEXES.....	89

Liste des figures

Figure 1.1: Évolution des températures dans des bâtiments au cours de l'année, sans effet des installations techniques de chauffage ou climatisation. La bande grisée représente les exigences de confort. C représente la température extérieure, A un bâtiment bien conçu et B un bâtiment inadapté à son climat [6].....	4
Figure 1.2: Répartition des échanges de chaleur d'une personne en fonction de la température ambiante, supposée homogène [6].....	7
Figure 1.3: Débit d'air requis pour évacuer les divers polluants produits par une personne assise ayant une activité de bureau [6].....	8
Figure 2.1: Conductivité thermique rapportée à l'air des matériaux de construction [6]..	11
Figure 2.2: Définition des aires de vitrage et de cadre [6].....	16
Figure 2.3: Effet du profil écarteur des vitrages isolants sur le coefficient de déperdition global de la fenêtre [6].....	16
Figure 2.4: Le bâtiment est un tonneau des Danaïdes: on maintient le confort grâce à un flux d'énergie. A gauche, bâtiment mal construit, à droite, bâtiment correct [6].....	17
Figure 2.5: Délimitation spatiale [6].....	18
Figure 2.6: Principes du chauffage solaire passif [6].....	24
Figure 2.7: Coordonnées apparentes du soleil par rapport au vitrage [7].....	28
Figure 2.8: Calcul des ombres résultant d'un retrait ou d'une saillie de la façade [7].....	28
Figure 3.1 : Façade de la maisonnette.....	30
Figure 3.2 : Déperditions et Gains du mur SE en été pendant une journée.....	44
Figure 3.3 : Déperditions et Gains du mur SE en hiver pendant une journée.....	44
Figure 3.4 : Déperditions et Gains du mur NE en été pendant une journée.....	45
Figure 3.5 : Déperditions et Gains du mur NE en hiver pendant une journée.....	46
Figure 3.6 : Déperditions et Gains du mur NO en été pendant une journée.....	47
Figure 3.7 : Déperditions et Gains du mur NO en hiver pendant une journée.....	47
Figure 3.8 : Déperditions et Gains de la toiture en été pendant une journée.....	48
Figure 3.9 : Déperditions et Gains de la toiture en hiver pendant une journée.....	49
Figure 4.1:Schéma de principe d'un capteur solaire plan [6].....	54
Figure 4.2: Capteur à concentration [6].....	54
Figure 4.3: Capteur plan [6].....	54
Figure 4.4: Schéma de principe d'une installation solaire [6].....	56

Figure 4.5: Schéma de principe du mur capteur [9].....	57
Figure 4.6: Protection solaire du mur capteur [9].....	60
Figure 4.7: Installation d'un meuble devant un mur capteur [9].....	61
Figure 4.8: Plafond climatique dans une salle de conférence [6].....	62
Figure 4.9: Schéma de principe du mur capteur [9].....	63
Figure 4.10 : la variation de la température du sol en fonction de la profondeur [10]....	64
Figure 4.11: Principe du puits canadien/provençal [10].....	65
Figure 4.12: la conductivité thermique de différents types de sols en fonction de leur teneur en eau [10].....	66
Figure 5.1 : Tube en méandre [10].....	69
Figure 5.2 : Tube en boucle [10].....	70
Figure 5.3 : puits constitué d'un faisceau de tubes [10].....	70
Figure 5.4 : système d'installation du puits en cas de présence d'un sous-sol [10].....	72
Figure 5.5 : système d'installation du puits en cas d'absence d'un sous-sol [10].....	73
Figure 5.6: circuit de distribution de l'air.....	80

Liste des tableaux

Table 2.1: Valeurs limites pour les coefficients linéiques de transmission thermique des ponts thermiques [6].....	16
Table 2.2: Bilan énergétique d'un bâtiment [6].....	19
Tableau 3.1 : Données climatologiques mensuelles de la ville d'Alger de 2006 à 2008 [8].....	31
Tableau 3.2 : Les surfaces de différentes pièces de la maisonnette.....	31
Tableau 3.3 : Les dimensions et les matières de construction des différentes portes et fenêtres.....	32
Tableau 3.4 : Les résistances thermiques par unité de surface et les épaisseurs des différentes couches des murs extérieurs.....	32
Tableau 3.5 : Les résistances thermiques par unité de surface et les épaisseurs des différentes couches des murs intérieurs.....	33
Tableau 3.6 : Les résistances thermiques par unité de surface et les épaisseurs des différentes couches de toit.....	33
Tableau 3.7 : Les résistances thermiques par unité de surface et les épaisseurs des différentes couches des planches entre étages.....	34
Tableau 4.8 : Les résistances thermiques par unité de surface et les épaisseurs des différentes couches du sol.....	34
Tableau 3.9 : Le bilan calorifique de la chambre 1 du 1 ^{ère} étage.....	37
Tableau 3.10 : Gains et déperdition par transmission et gains solaires des murs et des portes en été.....	38
Tableau 3.11: Gains et déperdition par transmission et gains solaires des murs et des portes en hiver.....	40
Tableau 3.12 : les valeurs de x et y de la porte fenêtre.....	42
Tableau 3.13 : La surface ensoleillée et les gains solaire pour chaque heure de la journée de la porte fenêtre.....	42
Tableau 3.14 : la charge dus par l'infiltration d'air extérieur ou moment ou la porte fenêtre est ouverte.....	43
Tableau 3.15 : La charge dus a l'environnement intérieur.....	43
Tableau 3.16 : Les bilans calorifiques de différentes pièces.....	50
Tableau 4.1 : Propriétés thermiques des principes constituants d'un sol [10].....	67

Tableau 5.1 : caractéristiques de soufflage de chaque bouche.....	75
Tableau 5.2: calcul des pertes de charge du circuit principale O-8.....	77
Tableau 5.3: calcul des coefficients de pertes de charge singulières du circuit principale O-8.....	78
Tableau 5.4: calcul des coefficients de pertes de charge singulières des circuits dérivés.	79
Tableau 5.5: calcul des pertes de charge des différents circuits de l'installation.....	81

Nomenclature

Q	: quantité de chaleur [J]
m	: masse [kg]
c	: chaleur spécifique [$J/kg K$]
θ ou T	: température [K] ou [$^{\circ}C$]
$\Delta\theta$ ou ΔT	: différence de température [K] ou [$^{\circ}C$]
q	: densité de flux de chaleur [W/m]
λ	: conductivité thermique [W/mK]
e	: épaisseur [m]
h_r	: coefficients de transfert de chaleur par rayonnement [W/m^2K]
h_c	: coefficients de transfert de chaleur par convection [W/m^2K]
R	: résistance thermique [m^2K/W]
R_s	: résistance superficielle [m^2K/W]
R_t	: résistance thermique totale [m^2K/W]
R_g	: résistances thermiques des lames d'air [m^2K/W]
U	: coefficient de transmission thermique [W/m^2K]
Λ	: conductance thermique [W/m^2K]
θ_i ou T_i	: température intérieure [K] ou [$^{\circ}C$]
a	: coefficient d'absorption
ρ	: masse volumique [kg/m^3]
∇^2	: le Laplacien
A	: Surface [m^2]
P	: Pression [Pa]
Ψ	: Coefficient linéique de transmission thermique [$W/(m \cdot K)$]
χ	: coefficient de transmission thermique ponctuel [W/K]
H_T	: coefficient de déperditions par transmission [W/K]
U_f	: coefficient de transmission thermique global d'une fenêtre [W/m^2K]
H	: hauteur [m]
l	: largeur [m]
U_v	: coefficient de transmission thermique du vitrage [W/m^2K]
A_v	: aire du vitrage [m^2]
U_c	: coefficient de transmission thermique du cadre [W/m^2K]
A_c	: aire du cadre [m^2]
L_v	: périmètre total des vitrages [m]
Ψ_c	: coefficient de transmission thermique linéique du cadre du vitrage [W/K]
Q_c	: consommation d'énergie de chauffage [J]
Q_T	: déperditions par transmission [J]
Q_V	: déperditions par ventilation [J]
η	: facteur d'utilisation.
Q_l	: déperditions totales [J]
t	: durée de la période de calcul (en principe le mois)
H	: coefficient de déperditions [W/K]
H_T	: coefficient de déperditions par transmission [W/K]

H_V	: coefficient de déperditions par renouvellement d'air [W/K]
H_D	: coefficient de déperditions par transmission directe [W/K]
H_S	: coefficient de déperditions par le sol [W/K]
P	: périmètre [m]
U_0	: coefficient de transmission thermique apparent [W/m^2K]
d_t	: épaisseur équivalente de terrain [m]
d_m	: épaisseur de la paroi verticale [m]
R_f	: résistance thermique totale de la dalle [m^2K/W]
Q_S	: gains solaire [J]
Q_i	: gains interne [J]
I_{sj}	: irradiance solaire sur une surface unitaire ayant l'orientation j [W/m^2]
A_{snj}	: aire réceptrice équivalente de la surface n ayant l'orientation j [m^2]
F_f	: facteur de forme entre la paroi et le ciel (1 pour un toit horizontal sans ombre, 0,5 pour un mur vertical sans ombre)

INTRODUCTION GENERALE

La question du confort, au sens de la problématique des ambiances, suscite un intérêt croissant dans le domaine du bâtiment, impliquant une nouvelle approche du système constitué par l'enveloppe, les équipements et les occupants, et formulée par les architectes du Mouvement moderne.

En fait les individus passant la majeure partie de leur temps en milieu clos, habitat, logement, bureau et plus généralement lieux de travail, il est naturel de rechercher la meilleure qualité d'espace de vie [1].

Depuis longtemps, l'habitat est unanimement perçu comme un important consommateur d'énergie, et ce d'abord pour sa climatisation intérieure – chauffage ou rafraîchissement selon les saisons. Avec ce poste, mais aussi ceux de la production d'eau chaude, de ventilation et des appareils consommateurs d'électricité, le secteur « résidentiel tertiaire » (habitats et bureaux) représente environ 45% de l'énergie totale consommée au monde, et 26% des émissions de gaz carbonique, en augmentation de 14% entre 1990 et 2003.

C'est depuis la fin du 19^{ème} siècle et plus encore au début du 20^{ème} siècle que le pétrole a pris toute son importance comme combustible en vue de produire de l'énergie puis, dans l'entre-deux guerres, comme matière première pour la production de multiples matières plastiques [2].

L'évolution de l'humanité est fortement liée au développement des ressources énergétiques, traduite par une augmentation quasi-exponentielle de la consommation énergétique mondiale [1].

Le développement des transports motorisés, et notamment de l'automobile, des applications pétrochimiques et de la consommation énergétique en général, a démultiplié les besoins mondiaux en pétrole.

La plupart des pays sont fortement dépendants des cours pétrolier ; si bien que la forte augmentation des cours du pétrole imposée en 1973 par les pays producteurs a eu des

conséquences très marquées sur la santé économique des pays industrialisés et a été le point de départ d'une longue crise économique : ce fut le premier choc pétrolier. Le deuxième choc pétrolier a eu lieu en 1979, lorsque l'OPEP releva encore les prix de vente du pétrole. De plus, la récente flambée des cours du pétrole aura peut-être une influence sur le comportement des consommateurs.

C'est pour limiter leur dépendance vis-à-vis des importations de pétrole, et donc par rapport aux pays producteurs, que beaucoup de pays consommateurs ont cherché par la suite à développer diverses stratégies : réduction de leur consommation en faisant des économies d'énergie, développement de filières de production locale d'énergies alternatives comme le nucléaire, l'énergie hydro-électrique, solaire, géothermique ou encore éolienne [2]. Cette préoccupation a conduit à l'utilisation expérimentale des techniques de rafraîchissement passives dans les espaces ouverts ou semi-ouverts et dans les bâtiments [3].

Le domaine du génie énergétique est donc un composant important du champ scientifique de l'ingénieur. Le renchérissement du coût de l'énergie, la complexité technique croissante et la multiplication des problèmes instationnaires ont en effet donné une importance particulière au traitement de la thermique du bâtiment [1].

Le génie climatique est l'un des domaines d'application privilégié de la discipline des transferts thermiques. Sa particularité réside dans une exploitation des lois de base sous une forme plus ou moins simplifiée, compatible avec la pratique du métier d'ingénieur. Bien que les moyens de calcul soient, depuis une trentaine d'années, en constante progression, il demeure indispensable de disposer des règles de calcul adaptées. Le calcul des installations de génie climatique, quant à lui, supporte et exige des outils de modélisation plus simples, pour des raisons à la fois opérationnelles, techniques et économiques, mais aussi pour préserver la cohérence de l'ensemble des modèles utilisés. Il serait en effet incorrect de modéliser très finement un transfert conductif dans une paroi, alors que les coefficients d'échanges de surface ne sont connus que très approximativement et varient beaucoup sur la globalité de cette surface [4].

Un logement construit aujourd'hui consomme deux fois moins d'énergie qu'un logement réalisé au début des années soixante-dix. Le chauffage et la production d'eau

chaude représentent cependant encore un quart de l'énergie consommée et contribuent dans la même proportion à la production des émissions de CO_2 [2].

L'habitat, selon sa consommation énergétique, peut être classé en différentes catégories :

- **Les bâtiments anciens** : mal isolés, érigés avant l'entrée en vigueur de seuils s'imposant aux constructions neuves, ce sont des « passoires thermiques ». Les pertes sont en moyenne, de l'ordre de 330 kilowattheures par mètre carré et par an pour des constructions datant d'avant 1975. Ce qui signifie qu'il faut leur apporter l'équivalent en chaleur de ces pertes pour maintenir la température intérieure à la valeur de 19°C. A l'énergie consommée par le chauffage s'ajoute, dans la maison, celle qui est nécessaire pour la production d'eau chaude – de l'ordre de 40 kWh/m²/an, et l'électricité dédiée à des usages spécifiques (électroménager, électronique,...), de l'ordre de 35 kWh/m²/an.
- **Les constructions neuves** : elles ont beaucoup progressées sur le plan de l'isolation thermique, et peuvent afficher aujourd'hui, autour de 100 kWh/m²/an de pertes thermiques.
- **Les bâtiments à « haute performance énergétique »** : ils visent des pertes de l'ordre de 65 kWh/m²/an, grâce à une réalisation particulièrement soignée.
- **Les maisons dites passives**, qui ont pour exigence essentielle une consommation d'énergie de chauffage pour le bâtiment inférieure à 15 kWh/m²/an.

L'idée de maisons à basse consommation d'énergie constitue une révolution intellectuelle, qui devrait tenir lieu de boussole dans la construction neuve, dans les années à venir. En Allemagne, en Suède, en Suisse, en Autriche,... se sont développés des habitats dont la consommation énergétique totale est quatre fois inférieure à celles que définissent les réglementations officielles du secteur du bâtiment [2].

L'évaluation et l'optimisation technico-économique des bâtiments pour leur construction ou leur amélioration sont donc approchées par des méthodes de plus en plus

élaborées. La construction d'un bâtiment, à haute qualité environnementale, économe et confortable est désormais possible et entre dans le domaine réglementaire [1].

La maîtrise des consommations d'énergie dans les bâtiments repose, d'une part, sur des actions comportementales qui relèvent principalement de l'information et de la formation des acteurs et, d'autre part, sur la mise en œuvre de techniques ou procédés spécifiques qui, tout en préservant le service ou le confort rendu, visent à réduire les consommations d'énergie de façon pérenne. Ces techniques sont présentées pour chacun des usages de l'énergie, et leur intérêt ainsi que leur rentabilité peuvent être appréciés selon différents critères économiques et environnementaux [5].

Les recherches sont encore indispensables par l'amélioration des performances du bâtiment. C'est l'objet de notre travail, en l'occurrence, la recherche de systèmes passifs permet un gain en énergie.

Nous nous sommes intéressés par l'étude des systèmes passifs dans le bâtiment et nous avons opté pour le puits canadien et le mur trombe.

Chapitre I

GENERALITES

1.1 L'énergétique du bâtiment

1.1.1 Le bâtiment devrait être confortable

Un bâtiment devrait assurer, sans aucune consommation d'énergie, un confort au moins équivalent à celui régnant à l'extérieur.

S'il est bien conçu et construit, il peut fournir un confort nettement supérieur. Un tel bâtiment ne surchauffe pas ou peu en été et profite des gains solaires pendant les périodes froides, pour raccourcir la saison de chauffage.

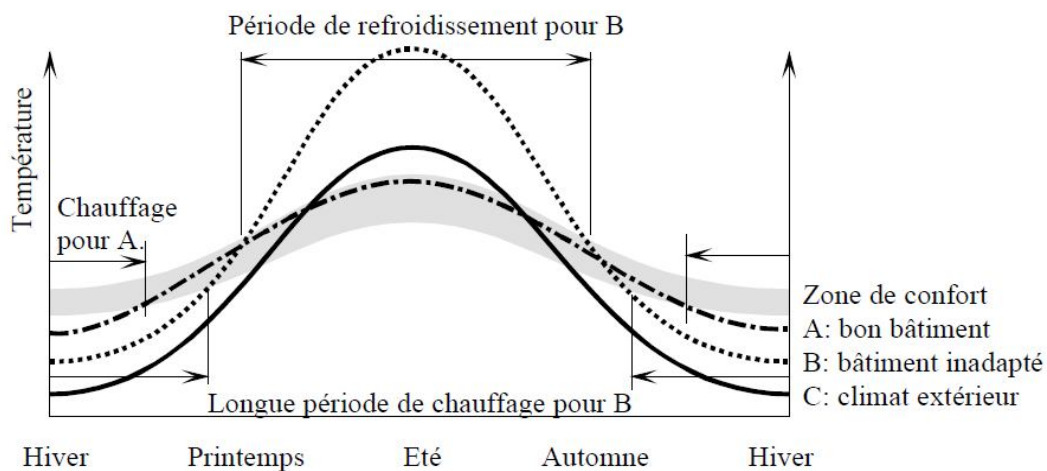


Figure 1.1: Évolution des températures dans des bâtiments au cours de l'année, sans effet des installations techniques de chauffage ou climatisation.

La bande grisée dans la figure 1 :1 représente les exigences de confort. Les courbes C représente la température extérieure, A un bâtiment bien conçu et B un bâtiment inadapté à son climat [6].

1.1.2 Applications de l'énergétique du bâtiment

Pour limiter la consommation d'énergie à des valeurs raisonnables, il est nécessaire de savoir où agir. Il faut donc pouvoir prédire les flux d'énergie dans le bâtiment, afin d'agir là où les mesures d'économie d'énergie seront les plus efficaces et les mieux à même d'offrir un confort élevé.

La connaissance des flux d'énergie au travers d'un bâtiment est nécessaire à la prise de décisions ou à la planification de travaux, notamment pour les tâches suivantes:

- Tenir compte de tous les critères voulus dans le choix de stratégies possibles lors de rénovation ou de construction d'ensemble d'immeubles. Parmi les critères à envisager, il y a non seulement le coût, l'esthétique ou l'habitabilité, mais aussi la consommation d'énergie.
- dimensionner correctement les installations énergétiques, en calculant la puissance de pointe minimum nécessaire;
- prévoir la consommation annuelle et la minimiser en choisissant la variante la plus économique globalement, tout en tenant compte du confort et des contraintes architecturales [6].

1.2 Rappels de physique du bâtiment

1.2.1 Capacité thermique

La chaleur est l'énergie liée à l'agitation aléatoire des molécules constituant la matière. Cette agitation se mesure par la température, et la chaleur par l'augmentation de température obtenue dans un matériau donné. Pour chauffer une masse m [kg] d'un matériau de chaleur spécifique c [J/kg K], de la différence de température $\Delta\theta$ [K], il faut une quantité de chaleur

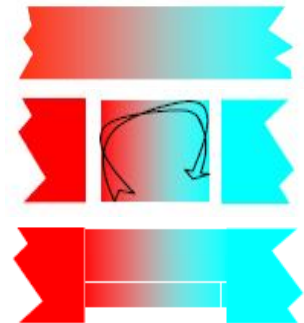
Q [J] donnée par l'expression ci-dessous:

$$Q = m c \Delta\theta \quad (1.1)$$

1.2.2 Modes de transfert de chaleur

La chaleur passe naturellement de zones chaudes aux zones froides, en utilisant essentiellement quatre modes de transport:

- La conduction, qui est la transmission de proche en proche de l'agitation moléculaire par chocs entre molécules;
- La convection, transport de chaleur par transport (naturel ou forcé) de matières chaudes vers une zone froide ou vice versa;
- Le rayonnement, ou transport de chaleur par émission et absorption de rayonnement électromagnétique par les surfaces des corps;



- L'évaporation-condensation: la chaleur cédée à un matériau pour l'évaporer est restituée à la surface sur laquelle la vapeur se condense.



1.3 Les besoins de l'occupant

Le rôle premier d'un bâtiment est de protéger ses occupants des rigueurs du climat extérieur. Un bâtiment confortable assure à ses habitants un climat intérieur agréable et peu dépendant des conditions extérieures, notamment météorologiques et acoustiques. La gestion optimale de l'énergie, quoique très importante du point de vue de son impact sur l'environnement, intervient en deuxième priorité, lorsque que les conditions de confort sont satisfaites.

Les exigences actuelles peuvent être classées en plusieurs catégories, qui interagissent entre elles: exigences de confort thermique, exigences de qualité d'air, besoins en éclairage, protection acoustique et exigences en termes de consommation d'énergie [6].

1.3.1 Confort

Le confort est un état de bien être général. Il est mesuré par le taux d'insatisfaction des occupants. Indépendamment des conditions propres à l'individu (métabolisme, activité, habillement), il est reconnu que les paramètres suivants interviennent dans le confort, en plus des paramètres qui caractérisent l'individu lui-même (taux d'activité, habillement, etc.):

Conditions thermiques:

- Température de l'air
- Sources de rayonnement (radiateurs, poêles, soleil)
- Température des surfaces environnantes
- Perméabilité thermique des surfaces en contact avec le corps

Qualité de l'air:

- Vitesse relative de l'air par rapport au sujet
- Humidité relative de l'air
- Pureté ou pollution de l'air, odeurs

Acoustique:

- Niveau de bruit, nuisance acoustique
- Temps de réverbération (durée d'écho)

Visuel:

- Éclairage naturel et artificiel
- Couleurs
- Volumes intérieur et distribution des volumes

Autres influences:

- Degré d'occupation des locaux
- "Ambiance"

Nous nous limiterons ici essentiellement aux conditions thermiques.

a) Confort thermique

Le confort est donc une sensation physiologique faisant intervenir plus d'un paramètre. Le confort thermique ne tient compte que des paramètres suivants:

Les facteurs liés à l'individu:

- Son activité et le rendement de cette activité
- Son habillement

Les facteurs liés à l'environnement:

- Températures de l'air et des surfaces environnantes
- Vitesse relative de l'air et le degré de turbulence
- Pression de vapeur d'eau ou humidité relative

En effet, la chaleur dégagée par le métabolisme, plus ou moins grande selon l'activité, est éliminée, directement ou au travers des habits, par convection et conduction vers l'air ambiant, par rayonnement vers les surfaces voisines et par évapotranspiration dans l'air (Figure 1.2) [6].

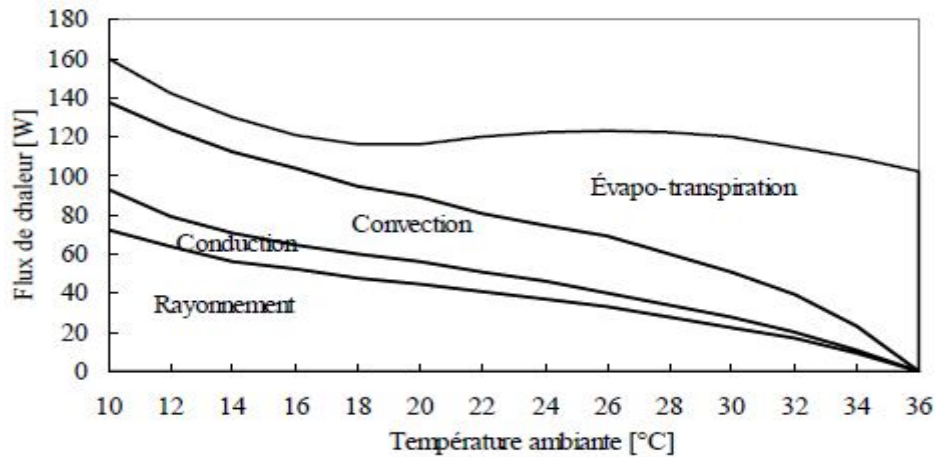


Figure 1.2: Répartition des échanges de chaleur d'une personne en fonction de la température ambiante, supposée homogène.

b) *Utilité du modèle de confort thermique*

L'étude et la prédiction du confort thermique permettent:

- le calcul de bilans énergétiques réels, tenant compte des occupants et de leurs exigences justifiées,
- le calcul des températures minima et maxima acceptables permettant de diminuer les besoins en énergie,
- la conception d'habitations offrant déjà un bon confort sans l'intervention des habitants, et permettant aux occupants d'agir à bon escient pour améliorer leur confort [6].

1.3.2 Aération

a) *Nécessité de l'aération*

Le but de l'aération est d'assurer un environnement intérieur confortable, maintenant les occupants en bonne santé. Un air sans cesse renouvelé à l'intérieur des bâtiments est nécessaire, non pour assurer l'apport d'oxygène indispensable à la vie, mais surtout pour éliminer au fur et à mesure les divers polluants générés dans le bâtiment et qui rendent l'atmosphère malodorante et toxique.

En l'absence d'aération, l'oxygène est la dernière chose qui manque. Les occupants seront incommodés en premier lieu par une concentration trop élevée en polluants divers, dont notamment les odeurs, la vapeur d'eau et la chaleur (Figure 1.3) [6].

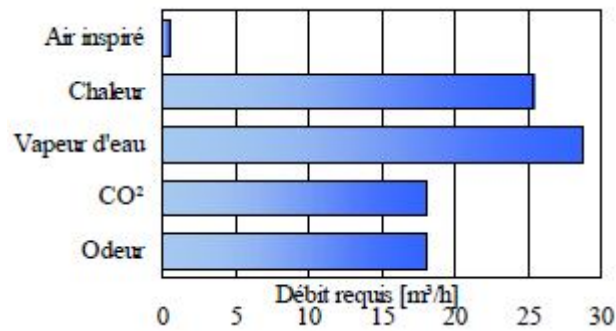


Figure 1.3: Débit d'air requis pour évacuer les divers polluants produits par une personne assise ayant une activité de bureau.

b) Conditions générales pour une bonne qualité d'air

Les trois conditions principales à remplir pour assurer une bonne qualité de l'air intérieur tout en limitant la consommation d'énergie sont:

1. Limiter l'intensité des sources de polluants
2. Contrôler les débits d'air
3. Réduire la perméabilité à l'air de l'enveloppe [6].

Chapitre II

BILAN ENERGETIQUE D'UNE HABITATION

2.1 Matériaux d'isolation

2.1.1 Conductivité thermique

On dirait qu'un matériau isolant thermique est un matériau à basse conductivité thermique apparente. Avec une épaisseur relativement faible, il présente une résistance thermique suffisante pour les besoins envisagés. C'est donc un matériau qui transmet mal la chaleur, que ce soit par conduction, convection ou rayonnement.

- Pour éliminer la conduction, il faut éliminer la matière. Le vide ne conduit pas la chaleur.
- Pour éliminer la convection, il faut immobiliser ou supprimer les fluides. Il n'y a de convection possible ni dans le vide, ni dans un fluide immobilisé.
- Pour éliminer le rayonnement, il faut des écrans opaques au rayonnement, ou des surfaces non émissives (donc réfléchissantes) au rayonnement thermique.
- Pour éliminer l'évaporation - condensation, il faut utiliser des matériaux secs.

Ces conditions sont partiellement contradictoires, et ne peuvent être bien réalisées que dans l'espace intersidéral, en traitant les surfaces des corps à isoler pour les rendre réfléchissantes.

Dans le bâtiment, l'aspect économique est primordial: c'est l'air immobilisé qui est l'isolant utilisé dans le bâtiment.

Dans un matériau isolant, la chaleur est donc transportée par les trois modes possibles conduction, rayonnement et convection, le premier étant dominant. Pour des raisons pratiques, on attribue donc la totalité du transfert de chaleur au travers du matériau à la conduction, en déterminant, par la mesure, une conductivité thermique apparente du matériau.

La conductivité thermique est la quantité de chaleur qui passe en 1 seconde au travers de 1 m² d'une couche de matériau homogène de 1 mètre d'épaisseur, soumis à une différence de température de 1 degré [6].

2.1.2 Isolants et conducteurs de la chaleur

Le rapport entre la conductivité thermique du matériau de construction le plus conducteur de la chaleur (l'aluminium) et celle d'un isolant courant est 5000. Ce rapport vaut 50 pour le béton et 4 pour le bois (Figure 2.1). Il s'ensuit qu'une interruption de la couche isolante par du bois n'est pas catastrophique, mais qu'une feuille aluminium de 0,1 mm d'épaisseur traversant une couche isolante conduit autant qu'une bande de 50 cm de large d'isolant.

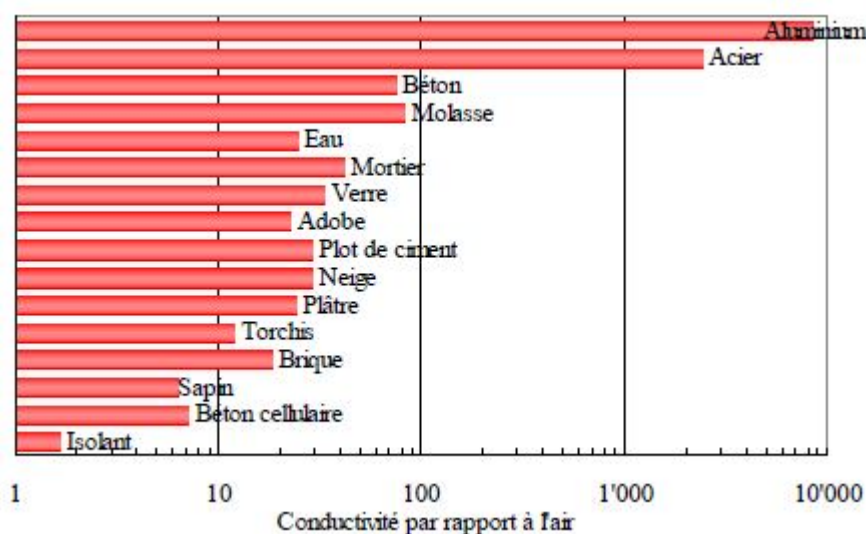


Figure 2.1: Conductivité thermique rapportée à l'air de plusieurs matériaux de construction.

2.2 Transmission thermique

2.2.1 Éléments plans formés de couches

Ce paragraphe traite du calcul pratique du coefficient de transmission thermique de composants multicouches.

Cette norme contient une méthode simplifiée pour le calcul d'éléments plans non homogènes qui n'est applicable que moyennant des concessions sur la précision.

Les effets d'une pose incorrecte des matériaux ou des éléments sur les propriétés thermiques des composants dépendent du type de construction et des combinaisons des matériaux. On peut en tenir compte soit en utilisant des données de base incluant un facteur de correction, soit en appliquant un facteur de sécurité sur le résultat du calcul.

a) Résistances thermiques pour des couches homogènes

La conduction est le mode de transfert de chaleur principal à l'intérieur des matériaux. Dans ce mode de transfert de chaleur, la densité de flux de chaleur q , est proportionnelle au gradient de la température θ , il est donnée par la loi de Fourier.

$$q = -\lambda \cdot \text{grad } \theta \quad (2.1)$$

Le signe moins signifie que la chaleur descend le gradient, s'écoule des zones chaudes aux zones froides, et ce d'autant plus fort que la pente (le gradient) est plus élevée. Le coefficient de proportionnalité λ s'appelle la conductivité thermique du matériau.

Les conductivités thermiques des matériaux se trouvent dans des normes ou sont données par les fabricants de matériaux.

La conductivité thermique apparente des matériaux varie avec la température, la densité, la teneur en humidité. Elle varie aussi avec l'épaisseur, surtout pour les isolants thermiques très légers ou très minces. Les valeurs données dans les tables se rapportent à des matériaux secs, à une température proche de 10°C et pour une épaisseur d'usage courant dans le bâtiment.

En régime stationnaire, à savoir lorsque la température et les flux de chaleur en tout point sont constants, la densité de flux traversant une couche homogène plane d'épaisseur e et de conductivité thermique λ soumise à une différence de température ΔT se calcule en intégrant l'équation de Fourier. On obtient:

$$q = -\lambda \frac{\Delta\theta}{e} \quad (2.2)$$

Par analogie avec la loi d'Ohm, ($U = R I$), on peut poser:

$$\Delta\theta = R \cdot q \quad \text{où} \quad R = \frac{e}{\lambda} \quad (2.3)$$

où R est la résistance thermique de la couche.

b) Résistance des couches limite

L'échange de chaleur entre une surface et son environnement se fait d'une part par rayonnement vers les autres surfaces environnantes et d'autre part par convection-conduction dans l'air. La densité de flux de chaleur entre la surface et son environnement peut donc s'exprimer par:

$$q = (h_r + h_c) \cdot \Delta\theta \quad (2.4)$$

où h_r et h_c sont les coefficients de transfert de chaleur par rayonnement et convection respectivement.

La résistance de la couche limite, ou résistance superficielle R_s , vaut donc:

$$R_s = \frac{\Delta\theta}{q} = \frac{1}{h_r+h_c} \quad (2.5)$$

Les résistances de transfert superficielles ont relativement peu d'importance dans la résistance totale d'un élément de construction bien isolé thermiquement. C'est pourquoi, pour les calculs de transfert de chaleur, on adopte souvent les valeurs conventionnelles suivantes, valables pour des surfaces émissives ($\varepsilon > 0,8$), incluant convection et rayonnement, et valables quelle que soit l'orientation:

A l'intérieur :	$h_i = 8 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$	$R_{si} = 0,13 \text{ m}^2\text{K}/\text{W}$
A l'extérieur :	$h_e = 25 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$	$R_{se} = 0,04 \text{ m}^2\text{K}/\text{W}$

c) Comportements formés de couches homogènes

La résistance thermique totale d'un composant plan formée de couches homogènes perpendiculaires au flux de chaleur est la somme des résistances des différentes couches du composant:

De surface à surface :

$$R_T = R_1 + R_2 + \dots + R_n + R_{g1} + R_{g2} + \dots + R_{gn} \quad (2.6)$$

D'environnement à environnement :

$$R_T = R_{si} + R_t + R_{se} \quad (2.7)$$

où: R_1, R_2, \dots, R_n sont les résistances thermiques des couches homogènes et $R_{g1}, R_{g2}, \dots, R_{gn}$ sont les résistances thermiques des lames d'air.

d) Transmission thermique

Le coefficient U de transmission thermique des composants est l'inverse de la résistance thermique totale d'environnement à environnement, alors que la conductance thermique Λ est l'inverse de la résistance de surface à surface

$$U = 1/R_T \quad \text{et} \quad \Lambda = 1/R_t \quad (2.8)$$

Ainsi, la densité de flux de chaleur passant au travers d'une paroi plane en régime stationnaire est donnée par:

$$q = U(T_i - T_e) \quad (2.9)$$

En d'autres termes, le coefficient U donne le flux de chaleur au travers d'un mètre carré de paroi pour une différence de température de 1 degré entre les deux environnements.

2.2.2 Ponts thermiques

Un pont thermique est constitué par toute discontinuité dans la couche isolante, par tout endroit où la résistance thermique présente une faiblesse. Au voisinage d'un pont thermique, les lignes de flux se resserrent: plus de chaleur passe par unité de surface. Les isothermes se déforment en s'écartant les unes des autres. Les lignes de flux restent néanmoins perpendiculaires aux isothermes. Ces ponts ne causent pas seulement des pertes de chaleur inutiles, mais peuvent être sources de dégâts: moisissures, taches de poussière [6].

a) Déperditions de chaleur dues aux ponts thermiques

La répartition de température dans un matériau de forme quelconque soumis à des conditions aux limites données se calcule en résolvant l'équation de la chaleur :

$$\frac{\delta\theta}{dt} = \alpha\nabla^2\theta + \frac{\phi}{\rho c} \quad (2.10)$$

Cette équation s'obtient en combinant l'équation de Fourier avec la conservation de la chaleur en tout point. En absence de source de chaleur et en régime stationnaire, l'équation de la chaleur se réduit à l'équation de Poisson:

$$\nabla^2\theta = 0 \quad (2.11)$$

Les déperditions thermiques (en Watt) d'une paroi plane sans pont thermique sont calculées en multipliant l'aire de cette paroi par son coefficient U et par la différence de température entre l'intérieur et l'extérieur:

$$Q = AU(\theta_i - \theta_e) \quad (2.12)$$

Une méthode simplifiée permettant de tenir compte des ponts thermiques dans le calcul des déperditions de chaleur consiste à attribuer aux ponts thermiques de ce type un coefficient de transmission thermique linéique Ψ , en $W/(m\cdot K)$, qui, multiplié par la longueur du pont thermique (par exemple le périmètre de la dalle), s'ajoute aux déperditions des parois:

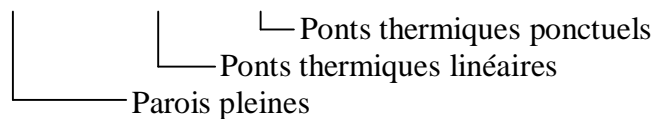
$$Q' = [AU + l\Psi](\theta_i - \theta_e) \quad (2.13)$$

Table 2.1: Valeurs limites pour les coefficients linéiques de transmission thermique des ponts thermiques.

Coefficient linéique de transmission thermique Ψ	Limite $W/(m \cdot K)$
Type 1: dalle de balcon, avant-toit, etc.	0,30
Type 2: liaison entre éléments d'enveloppe massifs	0,20
Type 3: arête horizontale ou verticale telle que faîte, corniche, socle	0,20
Type 4: châssis de fenêtre ou caisson de store (si pas déjà dans la valeur U de la fenêtre)	0,30
Type 5: appui de fenêtre contre mur (embrasure, tablette, linteau)	0,10
Élément ponctuel traversant l'isolation thermique (coefficient χ) (piliers, supports, consoles, etc.)	0,30 W/K

On attribue de même un coefficient de transmission thermique ponctuel χ , en W/K , aux ponts thermiques locaux constitués par des fixations ou des éléments en forme de barres traversant la couche isolante. Si on tient compte de tous les éléments de l'enveloppe, le coefficient de déperditions par transmission de celle-ci vaut:

$$H_T = \sum_i A_i U_i + \sum_k l_k \Psi_k + \sum_j \chi_j \quad (2.14)$$



Ce coefficient H_T est la puissance nécessaire pour compenser les déperditions par transmission au travers de l'enveloppe lorsqu'il y a 1 degré de différence entre l'intérieur et l'extérieur.

2.2.3 Transmission thermique des fenêtres

Les fenêtres comportent de nombreux ponts thermiques. Pour simplifier le calcul des déperditions, on détermine en premier lieu les aires du vitrage et du cadre (Figure 2.2), puis on calcule approximativement le coefficient de transmission thermique global d'une fenêtre U_f par:

$$U_f = \frac{A_v U_v + A_c U_c + L_v \Psi_c}{A_v + A_c} \quad (2.15)$$

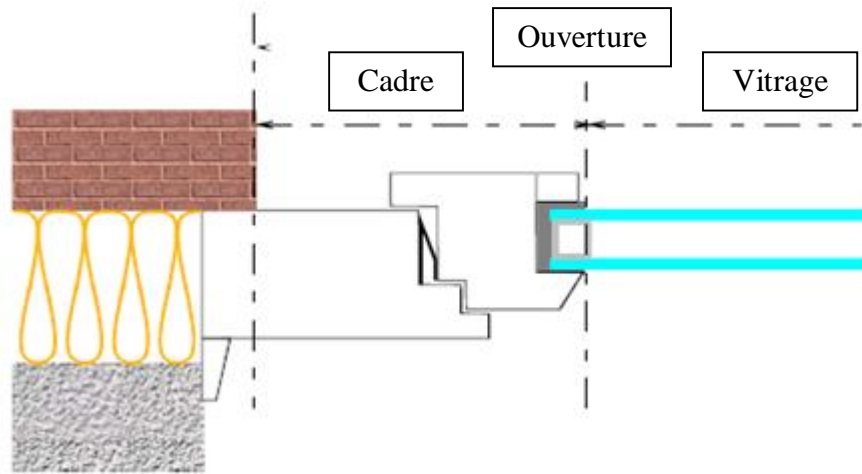


Figure 2.2: Définition des aires de vitrage et de cadre.

Le profil d'aluminium ou d'autre matériau liant les glaces des vitrages isolants constitue un pont thermique dont il faut tenir compte. On voit en effet dans la Figure 2.3 que les déperditions thermiques augmentent près des bords des vitrages, et ce presque indépendamment du type de cadre.

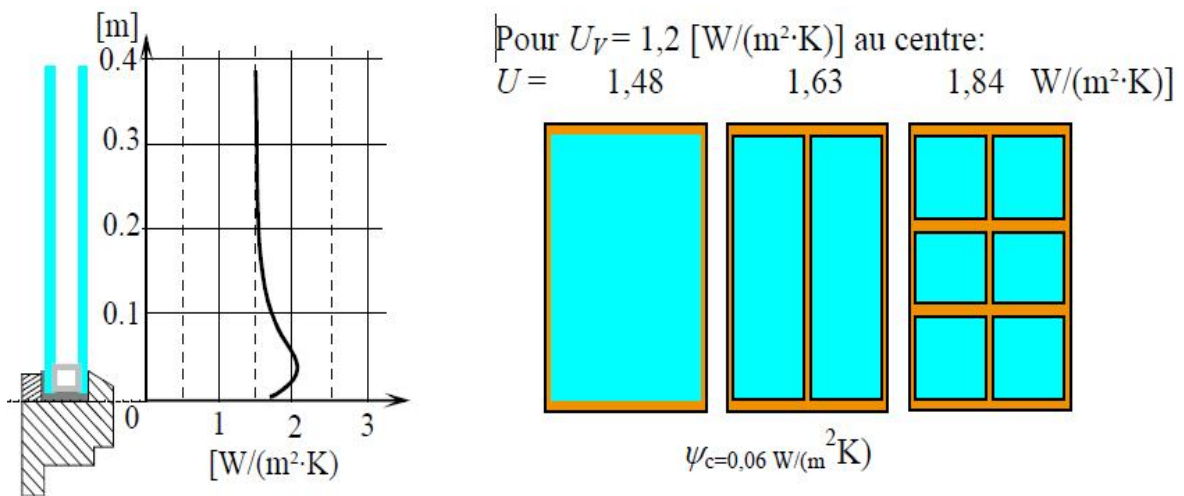


Figure 2.3: Effet du profil écarteur des vitrages isolants sur le coefficient de déperdition global de la fenêtre.

La conductance linéique ψ_c vaut entre 0,03 et 0,1 W/(m·K) suivant le type d'écarteur, et la longueur L_v à introduire est le périmètre de tous les vitrages. Par exemple, pour les trois fenêtres de la Figure 2.3 on aurait approximativement, si H est la hauteur totale des vitrages et l leur largeur totale:

$L_v = 2(H + l)$ pour la première fenêtre, à un seul vitrage

$L_v = 2(2H + l)$ pour la deuxième fenêtre, à deux battants

$L_v = 2(2H + 3l)$ pour la troisième fenêtre, à petits bois

2.3 Bilan énergétique du bâtiment

2.3.1 Bilan énergétique

Si l'on désire optimiser le confort tout en minimisant la consommation d'énergie achetée, il est nécessaire de comprendre où passent les flux de chaleur et de connaître leur importance. Or il est difficile et onéreux de mesurer tous les flux de chaleur traversant un bâtiment, et cette mesure est impossible sur un bâtiment en projet. C'est pourquoi le calcul du bilan énergétique du bâtiment est d'une grande utilité.

Le bilan énergétique du bâtiment est basé sur le fait que pratiquement toute l'énergie entrant dans un bâtiment finit par être transformée en chaleur. Étant donné qu'en moyenne, l'intérieur du bâtiment est à température constante, toute cette énergie finit par en sortir. Le bâtiment peut être comparé à un tonneau des Danaïdes dans lequel on maintient un niveau d'eau en le remplissant continuellement (Figure 2.4). Le niveau correspond au confort demandé et le débit d'eau aux flux d'énergie. Une partie de l'énergie est perdue, parce que versée à côté du tonneau.

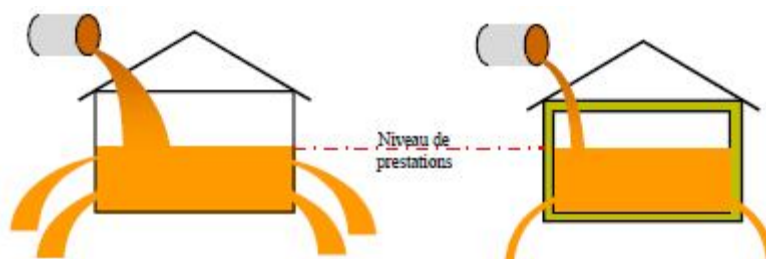


Figure 2.4: Le bâtiment est un tonneau des Danaïdes: on maintient le confort grâce à un flux d'énergie. A gauche, bâtiment mal construit, à droite, bâtiment correct.

Le bilan énergétique est une comptabilité des entrées et des sorties d'énergie du bâtiment pendant une période de temps donnée. Ce bilan doit évidemment être équilibré, par conservation de l'énergie. Le bilan énergétique détaille donc toutes les pertes et tous les gains, les sommes des gains et des pertes étant égales si la période de consommation est

suffisamment grande (par exemple une année, voire un mois s'il n'existe pas de capacité de stockage particulièrement grande).

Table 2.2: Bilan énergétique d'un bâtiment.

Déperditions		Gains	
Transmission de chaleur au travers de l'enveloppe		Rayonnement solaire entrant par les fenêtres et autres systèmes de captage passifs	
Transmission de chaleur au travers du sol		Chaleur métabolique des habitants	
Pertes de chaleur dans l'air vicié		Capteurs solaires	
Pertes de chaleur dans les égouts (eau chaude)		Chaleur restituée par la structure	
Chaleur accumulée dans la structure		Apport d'énergie:	électricité
Déperditions des installations techniques			combustibles
Total des pertes	=	Total des gains	

a) Délimitation du système

Avant de calculer le bilan, il convient de délimiter le système étudié dans l'espace et dans le temps, et de définir les utilisations de l'énergie et les vecteurs énergétiques que l'on va considérer. Sans cette précaution, on ne peut définir ni les flux d'énergie (qui doivent traverser une frontière spatiale), ni l'énergie consommée (l'énergie utilisée est l'intégrale de la puissance pendant une certaine période de temps), ni les limites énergétiques du système (s'occupe-t-on du chauffage seulement ou du chauffage, cuisson, éclairage et sanitaire, ou encore de la totalité des besoins énergétiques en incluant les matières consommées et produites ainsi que leur transport).

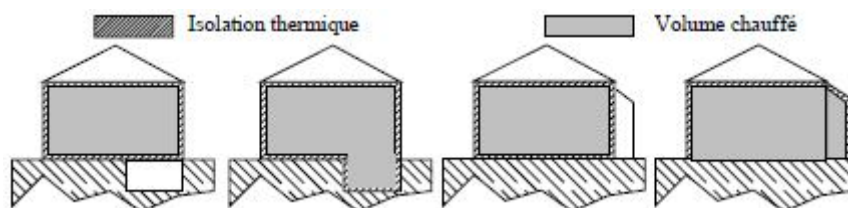


Figure 2.5: *Délimitation spatiale.*

Pour les bâtiments complexes, comportant différentes températures internes, il peut être nécessaire de définir plusieurs zones thermiques, ayant chacune une température interne que l'on puisse supposer homogène à l'intérieur de la zone.

La délimitation spatiale consiste à définir les frontières du domaine étudié, au travers desquelles passent les flux d'énergie à calculer. Pour un bâtiment, cette frontière est généralement constituée (Figure 2.5) par:

- l'enveloppe du bâtiment
- les compteurs d'entrée des sources d'énergie de réseau (électricité, gaz, chauffage à distance).
- les entrées des combustibles (mazout, charbon, bois).
- les surfaces de captage d'énergie solaire.
- les raccordements d'entrée de l'eau froide.
- les raccordements de sortie des égouts.

La délimitation temporelle consiste à définir la ou les périodes de temps pendant lesquelles on désire connaître le bilan. Pour les bâtiments, on peut prendre simplement une année entière.

On peut aussi s'intéresser séparément à la période de chauffage et à la période sans chauffage ou à la période avec climatisation artificielle.

Pour améliorer la précision du calcul, il est utile de calculer le bilan thermique pour chaque mois de l'année, puis de faire la somme sur l'année.

La délimitation par utilisation et par vecteur permet de définir le système énergétique dont on s'occupe. Dans le bâtiment, ces systèmes sont notamment:

- le système de chauffage.
- l'eau chaude.
- la cuisson.
- l'électroménager.
- l'éclairage.
- la climatisation.
- les transports et télécommunications.

Ces divers systèmes interagissent entre eux: ce qui peut être perte pour un système (par exemple les pertes thermiques du four de cuisson) peut être gain pour l'autre (ici pour

le chauffage pendant l'hiver). Sans délimiter le système, on ne pourra pas définir les gains et les pertes.

Les vecteurs énergétiques à considérer sont:

- les combustibles (mazout, charbon, gaz, bois, etc.).
- la chaleur à distance.
- l'électricité.
- le soleil.
- la chaleur humaine et animale.

Le besoin brut du bâtiment est la quantité d'énergie nécessaire pour maintenir, pendant une période de temps donnée, un climat intérieur convenable et satisfaire les autres prestations du bâtiment (eau chaude, cuisson, éclairage, etc.). Ces besoins bruts peuvent être satisfaits en partie par des sources d'énergie "gratuite" telles que rayonnement solaire et chaleur de l'environnement, le complément étant le besoin net.

Ce besoin net est couvert par une transformation d'énergie finale, impliquant des pertes. Cette énergie finale provient elle même d'énergie primaire transformée, impliquant d'autres pertes.

b) Bilan thermique

Nous allons examiner plus en détail l'approximation quasi-stationnaire, qui consiste à admettre qu'en moyenne, les flux de chaleur transférés à l'extérieur du bâtiment sont égaux aux flux de chaleur qui seraient transférés si les températures intérieures et extérieures étaient constantes et égales aux températures moyennes pendant la période considérée.

Dans ce modèle, on doit toutefois trouver moyen de tenir compte de la capacité thermique du bâtiment, qui ne peut apparaître effectivement que dans un modèle dynamique. De plus, les gains solaires passifs et les gains internes ne sont que difficilement contrôlables, et peuvent entraîner des surchauffes. L'occupant réagit à ces surchauffes en rejetant la chaleur en excès (en baissant des stores ou en ouvrant des fenêtres). On introduit alors des coefficients correctifs pour tenir compte de ce phénomène.

Le calcul simplifié du bilan thermique moyen s'exprime en termes d'énergie de la manière suivante:

$$Q_c = Q_T + Q_V - \eta(Q_s + Q_i) \quad (2.16)$$

Consommation d'énergie de chauffage = Déperditions par transmission
+ déperditions par ventilation
– gains utiles

En effet, l'augmentation (ou la diminution) de température dans la structure correspond à une quantité de chaleur négligeable par rapport aux autres quantités d'énergie. Par contre, le terme concernant les gains solaire et interne contiennent des termes correctifs η qui est le facteur d'utilisation.

Et Le facteur d'utilisation dépend du rapport gains/déperditions. C'est pourquoi il est recommandé de calculer le bilan en utilisant l'équation (2.17) pour chaque mois de l'année, puis de faire la somme sur l'année. Les résultats individuels de chaque mois peuvent présenter des erreurs relatives importantes, surtout en mi-saison et en été, mais la somme annuelle obtenue est précise.

c) Déperditions

Les déperditions totales Q_l d'un bâtiment à une seule zone, donc à température intérieure constante et uniforme pour une période donnée peuvent s'exprimer en fonction de la différence de température moyenne entre l'intérieur et l'extérieur:

$$Q_l = H(\theta_i - \theta_e)t \quad (2.17)$$

$$H = H_T + H_V \quad (2.18)$$

2.3.2 Déperditions par transmission

Dans cette partie, on présente les modèles simplifiés des phénomènes de transfert thermique par transmission au travers de l'enveloppe du bâtiment.

Le coefficient de déperditions par transmission H_T se calcule par:

$$H_T = H_D + H_S \quad (2.19)$$

- **Transmission directe vers l'extérieur**

Le *coefficient de déperditions par transmission* au travers des éléments séparant le volume chauffé de l'air extérieur se calcule par:

$$H_D = \sum_i A_i U_i + \sum_k l_k \Psi_k + \sum_j \chi_j \quad (2.20)$$

La somme est effectuée sur tous les composants de bâtiment séparant l'intérieur de l'extérieur.

- **Déperditions par le sol**

Les déperditions au travers du sol sont a priori complexes. Elles varient avec la saison, mais ne sont pas directement liées à la température extérieure. En effet, la propagation de la chaleur au travers des grandes épaisseurs de terrain est lente, et l'effet de la température extérieure présente un retard certain sur sa cause. De plus, la géométrie du flux de chaleur est tridimensionnelle. Toutefois, ces déperditions sont généralement faibles par rapport à celles du reste du bâtiment, et une méthode approximative fournit souvent un résultat suffisant.

Une méthode empirique représente un compromis entre la recherche de la simplicité et la capacité de tenir compte des diverses situations.

Elle est basée sur une grandeur caractérisant le bâtiment:

$$B = \frac{2A}{P} \quad (2.21)$$

Où A est l'aire du sol situé sous le bâtiment et P le périmètre en contact avec le sol. Cette grandeur entre dans le calcul d'un coefficient de transmission thermique apparent U_0 , qui lui-même entre dans le calcul du coefficient de déperditions par transmission au travers du sol :

$$H_s = A U_0 \quad (2.22)$$

Le coefficient de transmission thermique apparent U_0 , se calcule à l'aide de formules empirique.

On calcule d'abord l'épaisseur équivalente de terrain correspondant au parcours minimum que la chaleur doit suivre dans le terrain:

$$d_t = d_m + \lambda R_f \quad (2.23)$$

Où d_m est l'épaisseur de la paroi verticale constituant le périmètre, λ la conductivité thermique du sol ($2 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ à défaut de meilleure donnée) et R_f la résistance thermique totale de la dalle, incluant les résistances superficielles intérieure et extérieure.

Le coefficient de transmission thermique apparent U_0 dépend de l'isolation de la dalle. Si la dalle est mal isolée, c'est-à-dire si $d_t < B$, alors:

$$U_0 = \frac{2\lambda}{\pi B + d_t} \ln\left(\frac{\pi B}{d_t} + 1\right) \quad (2.24)$$

Si, par contre, la dalle est bien isolée, donc si $d_t > B$:

$$U_0 = \frac{\lambda}{0,457B + d_t} \quad (2.25)$$

2.3.3 Apports d'énergie solaire et gains internes

Les apports solaires dépendent de l'ensoleillement normalement présent sur le site concerné, de l'orientation des surfaces réceptrices, de l'ombrage permanent et des caractéristiques de transmission et d'absorption solaires des surfaces réceptrices. Les surfaces qui captent l'énergie solaire sont principalement les vitrages, mais aussi les parois et planchers intérieurs des surfaces ensoleillées, les parois situées derrière un revêtement transparent ou une isolation transparente, et même toute surface opaque exposée au soleil.

- **Principe du captage solaire passif**

Le rayonnement solaire entrant par les fenêtres et le cas échéant par d'autres éléments de captage spéciaux est transformé en chaleur à l'intérieur du bâtiment, et contribue ainsi au chauffage des locaux. Ce mode de faire présente de nombreux avantages, et en particulier la source d'énergie est gratuite et non polluante. Par contre, il présente quelques inconvénients auxquels il est nécessaire de pallier. Pour cela, il convient de suivre les quelques directives simples énoncées ci-dessous (Figure 2.6).

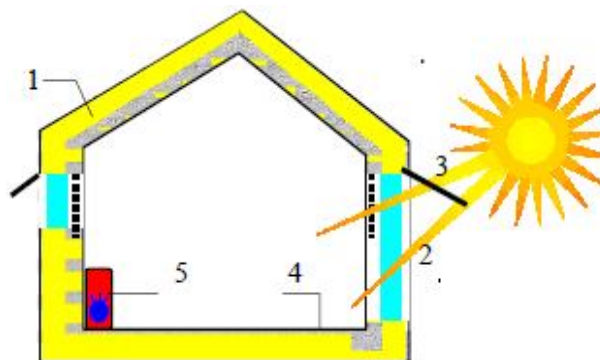


Figure 2.6: Principes du chauffage solaire passif.

1. Bonne isolation thermique.
2. Grands vitrages côté soleil.
3. Protections solaires mobiles.
4. Structure massive pour accumuler la chaleur.
5. Installation de chauffage et régulation adéquats.

1. Le rayonnement solaire est relativement diffus, en particulier en hiver, où il ne dépasse pas quelques centaines de watts par mètre carré. Pour capter une quantité de chaleur appréciable, il faut de grandes surfaces de captage, orientées vers les directions les plus ensoleillées (du sud-est au sud-ouest dans l'hémisphère nord).
2. Pour que cette chaleur, toujours limitée, représente une part importante des besoins, il faut limiter ces besoins au minimum par une isolation thermique soignée: fortes épaisseurs d'isolation et vitrages à hautes performances.
3. Lorsque la température extérieure est clémente et qu'il fait beau, ces surfaces apportent trop de gains. Il est donc indispensable de munir les surfaces de captage de dispositifs de contrôle. En particulier, il faut munir les fenêtres de protections solaires efficaces, donc extérieures. Des arbres à feuilles caduques sont souvent proposés, car ils apportent une ombre plus fraîche que des stores. Toutefois, ce type de protection n'est pas réglable, et ne peut pas être diminué pour améliorer l'éclairage naturel par mauvais temps en belle saison.
4. Pour augmenter l'efficacité du chauffage solaire passif, il faut répartir sur la journée les gains reçus pendant quelques heures seulement. L'inertie thermique du bâtiment doit donc être élevée, pour limiter les surchauffes en période ensoleillée, et restituer la chaleur accumulée pendant la nuit. Le bâtiment est donc massif et l'isolation est posée à l'extérieur de la structure.
5. Enfin, le chauffage d'appoint ne doit fonctionner que quand il est nécessaire. Il doit réagir rapidement aussi bien lorsque le soleil disparaît que lorsqu'il apparaît. Il faut donc une régulation thermique adéquate, qui tienne compte des gains solaires et des caractéristiques du système de chauffage. Des systèmes de contrôle prévisionnels peuvent pallier aux défauts des chauffages à grande inertie, comme le chauffage par le sol.

- **Calcul des gains solaires passifs**

En principe, toutes les surfaces exposées au rayonnement solaire sont potentiellement des *surfaces de captage*, permettant de transformer le rayonnement en une forme d'énergie

utile, le plus souvent en chaleur. Dans le bâtiment, les surfaces de captage utilisées pour le chauffage solaire passif sont:

- Les surfaces transparentes des fenêtres et portes
- Le sol et les murs des serres et vérandas
- Les parties opaques (façades, toiture), surtout si elles sont recouvertes d'une isolation transparente ou d'un vitrage (murs Trombe)

Les apports solaires dépendent de l'ensoleillement normalement présent sur le site concerné, de l'orientation des surfaces réceptrices, de l'ombrage permanent et des caractéristiques de transmission et d'absorption solaires des surfaces réceptrices. Pour une période de calcul donnée, les apports solaires s'obtiennent en sommant les apports de chaque surface de captage:

$$Q_s = \sum_j Q_{sj} = \sum_j I_{sj} \sum_n A_{snj} \quad (2.26)$$

Où la première somme s'effectue sur toutes les orientations j , et la seconde sur toutes les surfaces n qui captent le rayonnement solaire.

- ***Apports solaires des parois extérieures***

Les apports solaires nets annuels des parois opaques sans isolation transparente représentent une faible partie des apports solaires totaux et sont partiellement compensés par les pertes par rayonnement entre le bâtiment et le ciel clair. Ils peuvent donc être négligés.

Si, toutefois, les apports solaires dus à ces éléments apparaissent importants, par exemple pour des surfaces sombres fortement insolées, ou si les pertes par rayonnement apparaissent importantes, par exemple pour de grandes surfaces en regard du ciel, les apports et les déperditions de toutes les parois extérieures (opaques et transparentes) doivent être déterminées en tenant compte du bilan radiatif entre les rayonnements à courtes et grandes longueurs d'onde.

L'apport radiatif net d'une paroi ayant l'orientation j est calculé comme suit :

a) paroi opaque:

$$Q_s = UAR_e(\alpha I_{sj} - F_f h_r \Delta\theta_{er})t \quad (2.27)$$

b) vitrages, paroi transparente:

$$Q_S = (A_{Sj}I_{Sj} - UAR_e F_f h_r \Delta\theta_{er})t \quad (2.28)$$

Le coefficient de rayonnement extérieur h_r est donné par:

$$h_r = 4\varepsilon\sigma(\theta_{ss} + 273)^3 \quad (2.29)$$

En première approximation h_r peut être pris égal à $5 \varepsilon W/(m^2K)$, ce qui correspond à une température moyenne de $10 \text{ }^\circ\text{C}$.

Si la température du ciel n'est pas disponible dans les données climatiques, il convient de prendre, pour la différence $\Delta\theta_{er}$ entre la température de l'air extérieur et la température du ciel 9 K en Europe du nord, 11 K dans les régions méditerranéennes et 10 K dans les zones intermédiaires [6].

- **Calcul de A_s**

La plupart des vitrages sont plus ou moins protégés de l'ensoleillement direct par les ombres projetées par les parties en saillie de la construction. Les parties du vitrage situées à l'ombre ne sont alors atteintes que par le flux solaire diffus.

Pour déterminer si un vitrage ou une façade est à l'ombre ou non il faut auparavant déterminer :

- les coordonnées apparentes du soleil par rapport à la façade.
- Les dimensions caractéristiques de la saillie ou du retrait du vitrage.

1. Coordonnées apparentes du soleil

Les coordonnées apparentes du soleil par rapport au vitrage sont données par la figure 2.7

On distingue :

- La hauteur h du soleil au-dessus de l'horizon. Cette hauteur, en un lieu donné, varie de 0° à 90° .

Les valeurs de h sont données par l'annexe L en fonction de l'heure solaire, et de la latitude du lieu.

- L'azimut \hat{a} du soleil par rapport à la normale à la façade considérée.

Les valeurs de \hat{a} sont données par l'annexe M en fonction de la latitude, de l'orientation de la façade et de l'heure solaire.

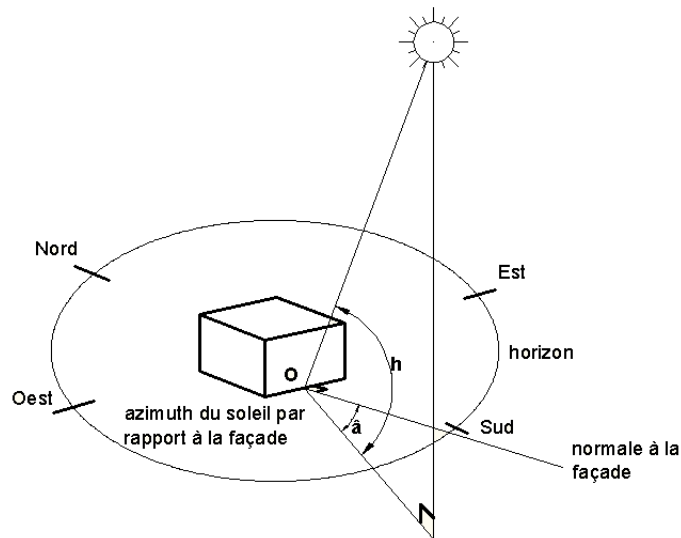


Figure 2.7 : Coordonnées apparentes du soleil par rapport au vitrage.

2. Dimension caractéristiques des ombres dues aux saillies ou aux retraits de la façade
La figure 2.8 détermine les dimensions caractéristiques à déterminer pour pouvoir calculer la surface ensoleillée du vitrage. Ces dimensions sont :

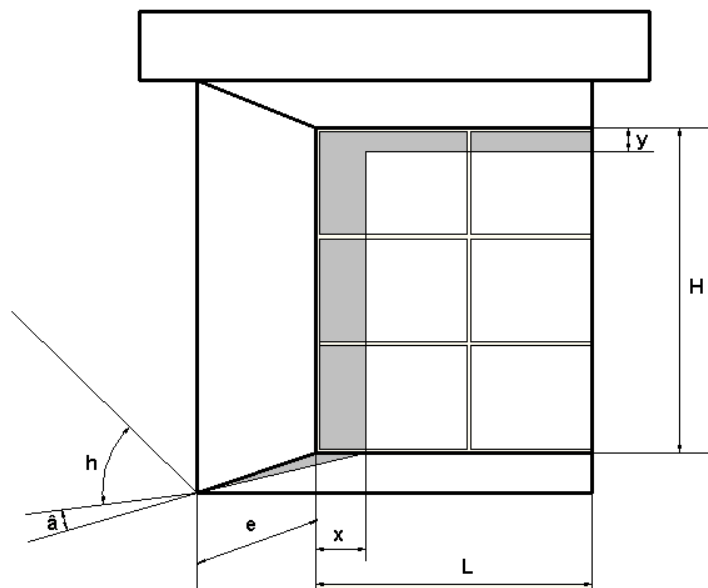


Figure 2.8 : Calcul des ombres résultant d'un retrait ou d'une saillie de la façade.

e : valeur du retrait [m]

l : largeur du vitrage [m]

H : hauteur du vitrage [m]

L'Annexe Q permet de déterminer simplement les x et y des ombres horizontales et verticales et, par conséquent, la valeur de l'aire du vitrage ensoleillée.

$$A_s = (L - x)(H - y) \quad (2.30)$$

- **Gains internes**

Les charges dues à l'environnement intérieur sont essentiellement constituées par les dégagements ou gains de chaleur et d'humidité à l'intérieur des locaux.

Leur importance dépend de l'utilisation à laquelle les locaux sont destinés.

Les gains intérieurs (enthalpie et humidité) ont essentiellement pour origine :

- ✓ les occupants.
- ✓ les machines électriques.
- ✓ l'éclairage.

a) Apports dus aux occupants

L'homme peut être assimilé à un générateur thermique, dont une partie de l'énergie produite est utilisée pour maintenir constante la température intérieure du corps, l'autre partie devant être dissipée dans le milieu ambiant sous forme de chaleur. L'évacuation de cette chaleur se fait d'une façon continue et essentiellement par convection (26% du total des échanges), par rayonnement (42%) et par évaporation (32%). La quantité totale de chaleur évacuée et, par conséquent, les rapports qui en résultent pour le local, sont :

- ✓ De la température sèche de l'air du local.
- ✓ Du degré hygrométrique.
- ✓ De l'activité de l'individu.

L'annexe N donne les valeurs des quantités totales de chaleur et d'humidité dégagées par un occupant en fonction de son activité et dans un milieu ambiant où le degré hygrométrique est comprise entre 40 et 70 %.

b) Apports dus machines électriques

Les machines électriques que l'on peut rencontrer dans les locaux sont très diverses.

En raison de leur fonctionnement à l'intérieur du local, elles émettent toutes une certaine quantité de chaleur dans l'ambiance. Certaines en plus dégagent de l'humidité.

L'annexe O donne les valeurs des quantités totales de chaleur et d'humidité dégagées par les machines électriques.

c) Apports dus à l'éclairage

En raison du fonctionnement de l'éclairage à l'intérieur des locaux, on considère que toute l'énergie électrique consommée se transforme intégralement en chaleur [7].

Chapitre III
CALCUL
ENERGETIQUE

Résultats et interprétation

3.1 Introduction

L'équilibre thermique d'un bâtiment est continuellement perturbé par des facteurs physiques inhérents à l'environnement extérieur et intérieur.

Le calcul de ces charges est la base de toute étude, il permet de connaître au départ l'influence et l'importance des contraintes de l'environnement sur le confort d'un bâtiment, l'estimation de ces charges doit se faire aussi réellement que possible et l'objet de cette partie.

3.2 Les données de base de la maisonnette

3.2.1 Spécificités du site

A. Paramètres géographiques

La maisonnette est située à Alger dar-El-Beida avec les paramètres géographiques suivants :

Latitude : $36^{\circ}41$ Nord.

Longitude : $03^{\circ}13$ Est.

Altitude : 25 m [8].

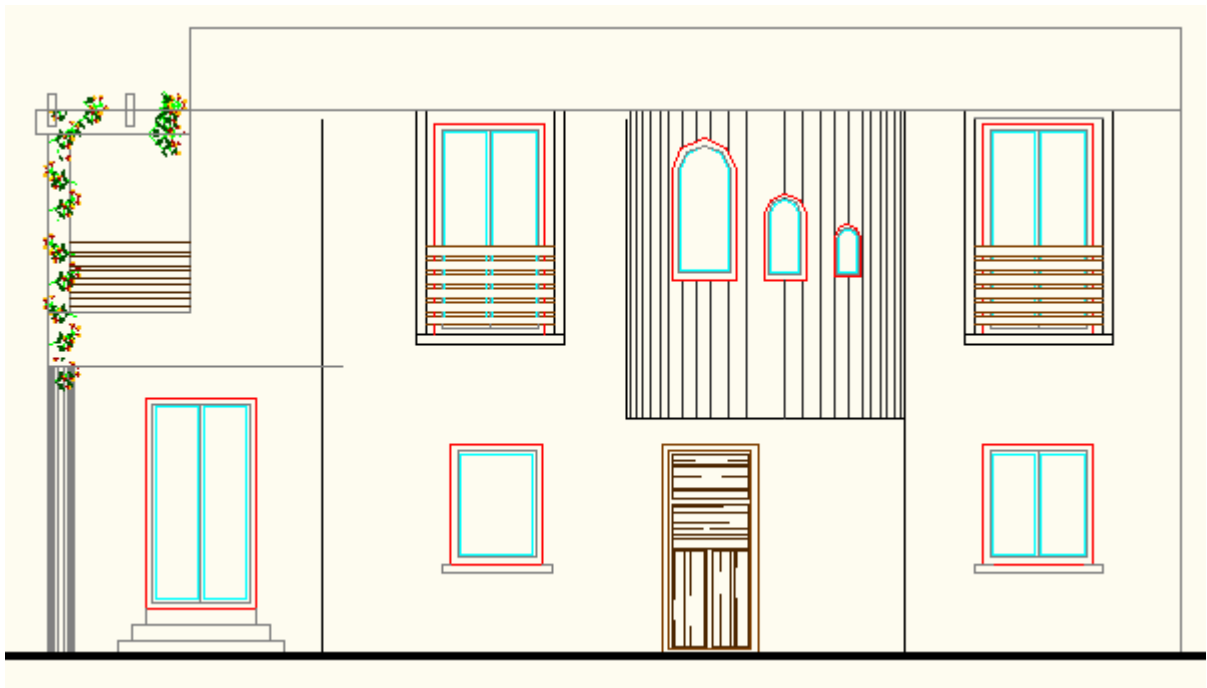


Figure 3.1 : Façade de la maisonnette.

• **L'orientation**

L'orientation de la maisonnette à la direction Sud-Est pour que :

- ✓ Les pièces occupées en permanence durant la journée soient orientées au Sud.
- ✓ Les chambres seront plutôt situées au Sud-Est, profitant du lever de soleil. Elles garderont ainsi leur fraîcheur en fin de journée.
- ✓ Les apports solaires sur les vitrages soient limités dans la cuisine.
- ✓ La véranda placée au sud permet, tout en apportant de la chaleur en hiver, de créer un espace intermédiaire entre l'intérieur et l'extérieur. Elle sera accessible depuis le séjour, la cuisine et les chambres.

B. Paramètres climatiques

Les paramètres climatiques de la maisonnette sont résumés dans le tableau (3.1):

Tableau 3.1 : Données climatologiques mensuelles de la ville de DAR-EL-BEIDA de 1996 à 2005.

Mois	janvier	février	mars	avril	mai	juin	juillet	août	septembre	octobre	novembre	décembre
T_{max} [°C]	17,3	17,2	20,0	21,9	24,7	29,4	31,6	32,7	29,6	26,6	20,6	17,9
T_{min} [°C]	5,7	5,0	7,1	8,9	12,6	16,4	19,0	20,2	17,6	14,2	9,7	6,1
φ_{em} [%]	79	81	77	75	77	71	70	69	72	74	79	79
V [m/s]	2,4	2,2	2,2	2,8	2,7	2,8	2,8	2,5	2,5	2,0	2,4	2,5

C. Paramètres géométriques

Tableau 3.2 : Les surfaces de différentes pièces de la maisonnette.

Type de locale	Surface [m²]	position	Type de locale	Surface [m²]	position
Salon	22,68	RDC	Chambre 1	09,50	1 ^{ère} étage
Cuisine	10,56	RDC	Chambre 2	12,00	1 ^{ère} étage
Salle de bain	04,65	RDC	Chambre 3	10,50	1 ^{ère} étage
Hall	04,45	RDC	Hall	08,40	1 ^{ère} étage
Chambre	09,50	RDC	Salle de bain	06,40	1 ^{ère} étage

L'hauteur de RDC et de la 1^{ère} étage est 2,86 m.

Tableau 3.3 : Les dimensions et les matières de construction des différentes portes et fenêtres.

Eléments		Dimensions [m]			Matière de construction
		Hauteur	Largeur	Epaisseur	
Portes	Porte à 1 éventail	2,2	0,9	0,03	Bois
	Porte de Sanitaire	2,2	0,75	0,02	Bois
	Porte à 2 éventails	2,3	1,2	0,006	Verre épais
	Porte extérieure	2,3	1	0,03	Bois rouge
Fenêtres	Grande	1,3	1,2	0,003	Verre simple
	Moyenne	1,3	1	0,003	Verre simple
	Petite	1,4	0,7	0,003	Verre simple
	Très petite	0,9	0,45	0,003	Verre simple

D. Paramètres thermiques

✓ Résistance thermique par unité de surface des murs extérieurs

Les résistances thermiques par unité de surface de l'extérieur vers l'intérieur et les épaisseurs des différentes couches de mur extérieur sont données dans le tableau (3.4) :

Les parties pleines d'une façade sont composées des couches suivantes:

Tableau 3.4 : Les résistances thermiques par unité de surface et les épaisseurs des différentes couches des murs extérieurs.

Matériau	Épaisseur d [cm]	Conductibilité thermique λ $W/(m \cdot K)$ [Annexe C]	Résistance $R=d/\lambda$ $m^2 K/W$
Enduit en plâtre	1,5	0,35	0,042
Brique creuse	10	0,44	0,227
Lame d'air	5	0,27	0,185
Brique creuse	15	0,44	0,340
Crépi extérieur	2	1	0,020

En tenant compte des résistances des couches limite intérieure et extérieure $U=1.016$
 $W/m^2 K$

✓ **Résistance thermique par unité de surface des murs intérieurs**

Les résistances thermiques par unité de surface de l'extérieur vers l'intérieur et les épaisseurs des différentes couches de mur intérieur sont données dans le tableau (3.5) :

Les parties pleines d'un mur intérieur sont composées des couches suivantes:

Tableau 3.5 : Les résistances thermiques par unité de surface et les épaisseurs des différentes couches des murs intérieurs.

Matériau	Épaisseur d [cm]	Conductibilité thermique λ $W/(m \cdot K)$ [Annexe C]	Résistance $R=d/\lambda$ $m^2 K/W$
Enduit en plâtre	1,5	0,35	0,042
Brique creuse	10	0,44	0,227
Enduit en plâtre	1,5	0,35	0,042

En tenant compte des résistances des couches limite des deux cotés de mur $U=1.751$
 $W/m^2 K$

✓ **Résistance thermique par unité de surface du toit**

Les résistances thermiques par unité de surface de l'extérieur vers l'intérieur et les épaisseurs des différentes couches de toit sont données dans le tableau (3.6) :

Tableau 3.6 : Les résistances thermiques par unité de surface et les épaisseurs des différentes couches de toit.

Matériau	Épaisseur d [cm]	Conductibilité thermique λ $W/(m \cdot K)$ [Annexe C]	Résistance $R=d/\lambda$ $m^2 K/W$
Gravillon	10	1,4	0,071
Carton bitumé	1	0,17	0,058
Béton de gravier	5	1,8	0,027
Hourdis (corps creux)	16	0,44	0,363
Enduit en plâtre	1,5	0,35	0,042

En tenant compte des résistances des couches limite intérieure et extérieure
 $U=0.845$ $W/m^2 K$

✓ **Résistance thermique par unité de surface de plancher entre étages**

Les résistances thermiques par unité de surface et les épaisseurs des différentes couches de plancher entre étages de l'extérieur vers l'intérieur sont données dans le tableau (3.7) :

Tableau 3.7 : Les résistances thermiques par unité de surface et les épaisseurs des différentes couches des planches entre étages.

Matériau	Épaisseur d [cm]	Conductibilité thermique λ $W/(m \cdot K)$ [Annexe C]	Résistance $R=d/\lambda$ $m^2 K/W$
Carrelage	2	1,51	0,013
Sable+Ciment	5	1,924	0,025
Béton de gravier	5	1,8	0,027
Hourdis (corps creux)	16	0,44	0,363
Enduit en plâtre	1,5	0,35	0,042

En tenant compte des résistances des couches limite des deux cotés de plancher.

$$U=1.818 \text{ W/m}^2 \text{ K}$$

✓ **Résistance thermique par unité de surface du sol**

Les résistances thermiques par unité de surface et les épaisseurs des différentes couches du sol de l'extérieur vers l'intérieur sont données dans le tableau (3.8) :

Tableau 4.8 : Les résistances thermiques par unité de surface et les épaisseurs des différentes couches du sol.

Matériau	Épaisseur d [cm]	Conductibilité thermique λ $W/(m \cdot K)$ [Annexe D]	Résistance $R=d/\lambda$ $m^2 K/W$
Carrelage	2	1,51	0,013
Sable+Ciment	5	1,924	0,025
Béton de gravier	5	1,8	0,027
Terre	51	1,15	0,443

La résistance totale de la dalle vaut $0,04+0.013+0.025+0.027=0,105 \text{ m}^2 K/W$, en tenant compte des résistances des couches limite.

$$\text{On a : } d_m = 0,3 \text{ m} \quad \text{et} \quad \lambda = 2 \text{ W}/(m \cdot K), \quad A = 66,61 \text{ m}^2, \quad P = 41,91 \text{ m}$$

D'après l'équation (2.21) on trouve : $B = 3,17 \text{ m}$

Et d'après l'équation (2.23) on trouve $d_t = 0,51 \text{ m}$

$d_t < B$ donc d'après l'équation (2.24) : $U_0 = 1,154$

En tenant compte des résistances des couches limite. $U=1,824 \text{ W/m}^2\text{K}$

✓ **Résistance thermique par unité de surface des portes en bois**

- Les portes intérieures sont fabriquées en bois de masse volumique égale à 200 kg/m^3 leur Résistance thermique par unité de surface est : $U=2 \text{ W/m}^2\text{K}$.
- Les portes des Sanitaires sont fabriquées en bois de masse volumique égale à 100 kg/m^3 leur Résistance thermique par unité de surface est : $U= 2,05 \text{ W/m}^2\text{K}$.
- La porte extérieure est fabriqués en bois de masse volumique égale à 600 kg/m^3 leur Résistance thermique par unité de surface est : $U= 4,73 \text{ W/m}^2\text{K}$.

✓ **Résistance thermique par unité de surface des vitrages**

- Les Portes-balcon sont fabriquées en verre épais de masse volumique égale à 2700 kg/m^3 leur Résistance thermique par unité de surface est :

D'après la relation (2.14) :

$$U_f = \frac{1,9228.1,2 + 0,832.2 + 9,28.0,06}{1,9228 + 0,8372} = 1,64 \text{ W/m}^2\text{K}$$

- Les grandes fenêtres sont fabriquées en verre simple de masse volumique égale à 2700 kg/m^3 leur Résistance thermique par unité de surface est :

$$U_f = \frac{1,0028.1,2 + 0,5572.2 + 5,28.0,06}{1,0028 + 0,5572} = 1,68 \text{ W/m}^2\text{K}$$

- Les fenêtres moyennes sont fabriquées en verre simple de masse volumique égale à 2700 kg/m^3 leur Résistance thermique par unité de surface est :

$$U_f = \frac{0,8611.1,2 + 0,4389.2 + 3,76.0,06}{0,8611 + 0,4389} = 1,64 \text{ W/m}^2\text{K}$$

- La première fenêtre de la cage d'escalier est fabriquée en verre simple de masse volumique égale à 2700 kg/m^3 leur Résistance thermique par unité de surface est :

$$U_f = \frac{0,6729.1,2 + 0,3455.2 + 4,0368.0,06}{0,6729 + 0,3455} = 1,70 \text{ W/m}^2\text{K}$$

- La deuxième fenêtre de la cage d'escalier est fabriquées en verre simple de masse volumique égale à 2700 kg/m^3 leur Résistance thermique par unité de surface est :

$$U_f = \frac{0,2213.1,2 + 0,1837.2 + 2,3112.0,06}{0,2213 + 0,1837} = 1,90 \text{ W/m}^2\text{K}$$

- La troisième fenêtre de la cage d'escalier est fabriquées en verre simple de masse volumique égale à 2700 kg/m^3 leur Résistance thermique par unité de surface est :

$$U_f = \frac{0,086.1,2 + 0,0753.2 + 1,43.0,06}{0,086 + 0,0753} = 2,1 \text{ W/m}^2\text{K}$$

- **Données intérieures de base retenues pour le calcul**

D'après l'annexe E on a :

		Salles de séjour	Salle à manger, cuisine	salon	chambres	Salles de bain, douches	Locaux à usage commun, circulations collectives
Eté	$T_i [^{\circ}\text{C}]$	24	24	24	22	26	26
	$\varphi [\%]$	50	50	50	50	50	50
Hiver	$T_i [^{\circ}\text{C}]$	18	18	18	18	21	18
	$\varphi [\%]$	50	50	50	50	50	50

- **Exemple de calcul**

Les résultats de calcul du bilan calorifique de la chambre 1 du 1^{er} étage sont résumés dans les tableaux. Les calculs ont été effectués avec Excel 2007.

Tableau 3.9 : Le bilan calorifique de la chambre 1 du 1^{ère} étage.

CHAMBRE 1												
Nature des parois	portes		Toiture	plancher	Murs extérieurs			Murs intérieur				
	SE				NE	SE	NO					
Dimensions [m]	Longueur		3,450	3,450	3,250	2,650	2,650	3,250				
	Largueur	1,200	0,900	2,750								
	Hauteur	2,300	2,300			2,860	2,860	2,860	2,860			
	Surface	2,760	2,070	9,488	9,488	9,295	7,579	7,579	9,295			
Surface utile A [m]	2,760	2,070	9,488	9,488	9,295	7,579	7,579	9,295				
U [W/m ²]	1,640	2,000	0,845	1,818	1,016	1,016	1,016	1,751				
U.A [W]	4,526	4,140	8,017	17,248	9,444	4,896	7,700	12,651				
ψ [W/m]	0,100	0,100	0,200	0,200	0,200	0,200	0,200	0,200				
L [m]	7,000	6,400	12,400	12,400	12,220	11,020	11,020	12,220				
ψ.l [W]	0,700	0,640	2,480	2,480	2,444	2,204	2,204	2,444				
ΔT		4,000		0,000				4,000				
Q _i	527,781	651,968	2554,535	0,000	1464,332	1075,966	1303,434	2238,941				9,816 MJ
Q _s	2147,610		2246,173		976,832	647,210	933,237					6,951 MJ
ΔT		-3,000		0,000				-3,000				
Q _i	-999,079	-1238,97	-1817,50	0,000	-2037,08	-1216,67	-1697,19	-4111,02				-13,118 MJ
Q _s	1791,437		1160,679		294,768	222,297	270,490					6,740 MJ

Tableau 3.10 : Suite

Heure solaire	Coefficient d'altitude et de climat	$\Delta\theta$	NO			Toiture			
			I_s [W/m ²]	Mur extérieur		I_s [W/m ²]	Mur extérieur		
				Q_t [KJ]	Q_s [KJ]		Q_t [KJ]	Q_s [KJ]	
0		-1,2		-85,573				-90,694	
2		-1,7		-121,228				-128,483	
4		1,4		-149,752				-158,714	
6	1,006	1,9		-60,614		115		-64,241	37,319
7	1,004	3,5		-10,697		307		-11,337	148,462
8	1,008	5,2		39,221		517		41,568	271,363
9	1,006	6,1		64,180		693		68,020	372,972
10	1,010	6,8		89,138		826		94,472	452,114
11	1,008	9,5		171,146		909		181,387	499,455
12	1,012	12,3		253,153		945		268,302	522,584
13	1,008	13,9		303,070		909		321,206	499,455
14	1,010	15		335,160		826		355,216	452,114
15	1,006	15	379	335,160	183,088	693		355,216	372,972
16	1,008	13	480	570,486	479,905	517		604,624	542,726
18	1,006	11,5	293	477,782	270,244	115		506,372	74,638
20		7,9		256,719				272,081	
22		2,7		-57,049				-60,462	

Tableau 3.11: Gains et déperdition par transmission et gains solaires des murs et des portes en hiver

Heure solaire	Coefficient d'altitude et de climat	$\Delta\theta$	SE						NE		
			I_s [W/m^2]	Mur extérieur		porte		I_s [W/m^2]	Mur extérieur		
				Q_t [KJ]	Q_s [KJ]	Q_t [KJ]	Q_s [KJ]		Q_t [KJ]	Q_s [KJ]	
0		-2,7		-138,026			-101,601			-231,097	
2		-3,5		-178,923			-131,705			-299,571	
4		-3,5		-178,923			-131,705			-299,571	
6	1,006	-3,5		-89,461			-65,853			-149,785	
7	1,004	-3,1		-79,237			-58,327			-132,667	
8	1,008	-2,7		-69,013	15,054	93	-50,801	202	202	-115,549	103,744
9	1,006	-2,3		-58,789	50,452	193	-43,275	330	330	-98,430	191,025
10	1,010	-1,9		-48,565	74,223	259	-35,749			-81,312	
11	1,008	-1,1		-28,116	82,569	283	-20,697			-47,075	
12	1,012	-0,3		-7,668			-5,645			-12,839	
13	1,008	1,3		33,228						55,635	
14	1,010	2,1		53,667						89,871	
15	1,006	2,1		53,667						89,871	
16	1,008	-0,8		-40,897			-30,104			-68,473	
18	1,006	-1,5		-76,681			-56,445			-128,387	
20		-2,9		-148,250			-109,127			-248,216	
22		-4,2		-214,707			158,046			-359,485	

Tableau 3.11 : Suite

Heure solaire	Coefficient d'altitude et de climat	$\Delta\theta$	NO			Toiture			
			I_s [W/m ²]	Mur extérieur		I_s [W/m ²]	Mur extérieur		
				Q_t [KJ]	Q_s [KJ]		Q_t [KJ]	Q_s [KJ]	
0		-2,7		-192,539				-204,060	
2		-3,5		-249,587				-264,523	
4		-3,5		-249,587				-264,523	
6	1,006	-3,5		-124,794				-132,261	
7	1,004	-3,1		-110,532				-117,146	
8	1,008	-2,7		-96,269		69		-102,030	10,686
9	1,006	-2,3		-82,007		184		-86,915	77,388
10	1,010	-1,9		-67,745		308		-71,799	150,108
11	1,008	-1,1		-39,221		415		41,568	212,012
12	1,012	-0,3		-10,697		496		-11,337	260,289
13	1,008	1,3		46,352		415		49,126	212,012
14	1,010	2,1		74,876		308		60,698	150,108
15	1,006	2,1	364	74,876	174,722	184		79,357	77,388
16	1,008	-0,8	222	-57,049	95,768	69		-60,462	10,686
18	1,006	-1,5		-106,966				-113,367	
20		-2,9		-206,801				-219,176	
22		-4,2		-299,505				-317,427	

Tableau 3.12 : les valeurs de x et y de la porte fenêtre

$r = 0,22\text{ m}$						
latitude	Heure solaire	h [°]	\hat{a} [°]	x [m]	y [m]	A_s
35° Nord	6	11	62	0,35	0,1	1,870
	7	23	55	0,32	0,18	1,866
	8	36	47	0,2	0,22	2,080
	9	48	37	0,17	0,3	2,060
	10	60	25	0,09	0,42	2,087
	11	70	2	0,02	0,53	2,089
	12	75	45	0,19	0,95	1,364

Tableau 3.13 : La surface ensoleillée et les gains solaire pour chaque heure de la journée de la porte fenêtre.

Porte fenêtre							
Heure solaire	A_s [m ²]	N	Coefficient d'altitude et de climat	EN ETE		EN HIVER	
				I_s [W/m ²]	Q_s [kJ]	I_s [W/m ²]	Q_s [kJ]
6	1,870	0,18	1,006	75	30,475	0	0
7	1,866	0,40	1,004	164	147,479	0	0
8	2,080	0,57	1,008	217	311,200	138	197,906
9	2,060	0,70	1,006	229	398,639	210	365,563
10	2,087	0,75	1,010	218	413,564	232	440,123
11	2,089	0,72	1,008	168	305,648	223	405,711
12	1,364	0,63	1,012	104	108,530	180	187,840
Q_s [kJ]					2147,610		1791,437

Tableau 3.14 : la charge dus par l'infiltration d'air extérieur ou moment ou la porte fenêtre est ouverte.

	Heure solaire	Débit massique d'air [kg/(h.m ³)]	Volume du locale [m ³]	h_i [kJ/kgas]	h_e [kJ/kgas]	Charge	Q_{inf} [MJ]
EN ETE	22	1,1	27,134	42,822	49,148	-377,663	-2,767
	0			42,822	48,031	-310,965	
	2			42,822	46,635	-227,630	
	4			42,822	45,539	-162,199	
	6			42,822	46,635	-227,630	
	7			42,822	50,546	-461,072	
EN HIVER	13	1,1	27,134	34,161	47,637	402,236	1,340
	14			34,161	49,871	468,919	
	15			34,161	49,871	468,919	

Tableau 3.15 : La charge dus a l'environnement intérieur

occupants				
Nombre d'occupants	Coefficient d'occupation	Type d'activité	Apport d'énergie par occupant [W/pers]	Charge [MJ]
1	0,83	Couché, inactif, sommeil	83	1,984
Machines électriques, processus industriels				
Machines de bureau :			1,440 MJ	
éclairage				
Puissance électrique installée [W]	Coefficient M		Charge [MJ]	
75	0,9		0,972	

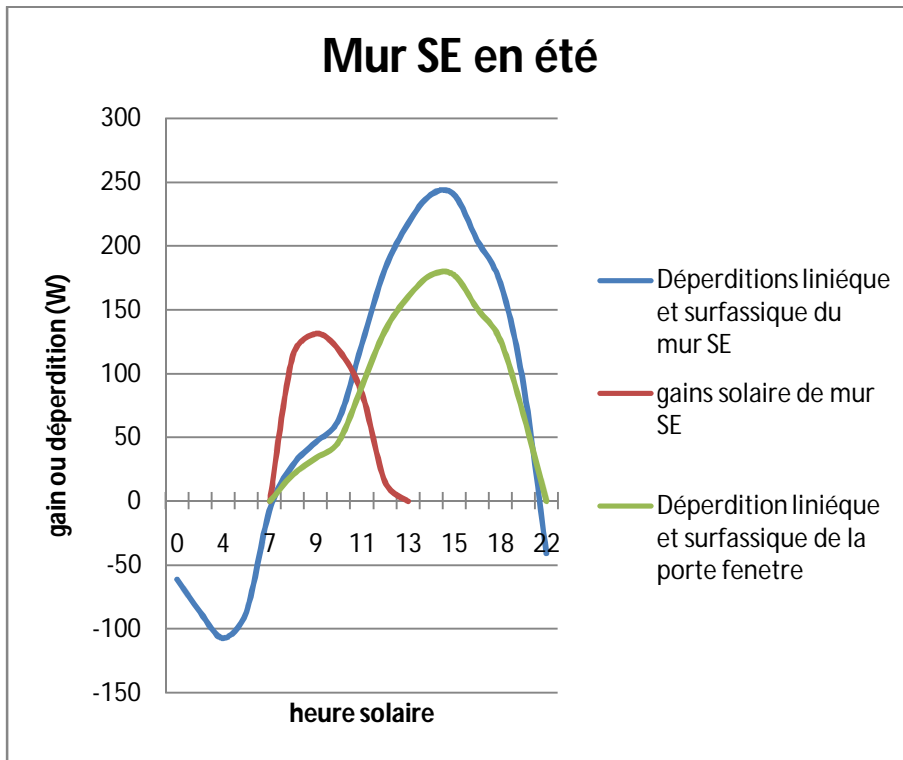


Figure 3.2 : Déperditions et Gains du mur SE en été pendant une journée

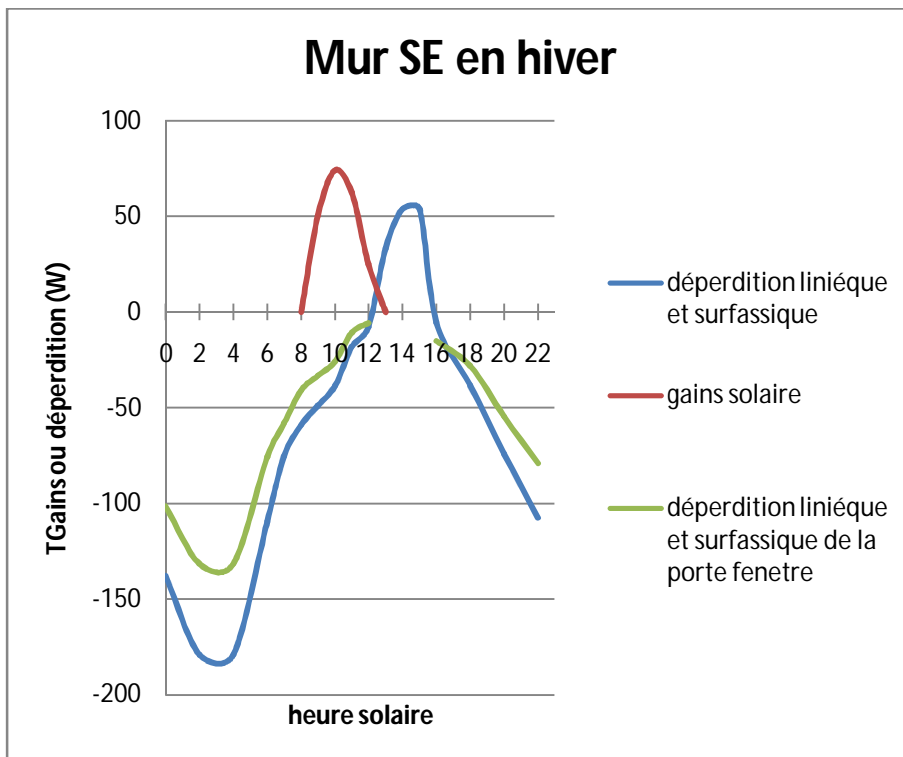


Figure 3.3 : Déperditions et Gains du mur SE en hiver pendant une journée

Interprétation :

- ✓ Le mur Sud-Est comporte plus de gains que des déperditions pendant l'été, de 4h jusqu'à 7h de matin il y a diminution de déperditions, donc à 7h la température extérieure est égale à la température intérieure, puis de 7h jusqu'à 15h il y a des gains a travers le mur et la porte fenêtre, à 15h le gains est maximum, et après 15h il y a une diminution dans les gains.

Les gains solaires à travers le mur augmentent de 7h jusqu'à atteint son maximum à 9h, puis il diminué et s'annule à 13h.

- ✓ Le mur Sud-Est comporte plus de déperditions que des gains pendant l'hiver, de 4h jusqu'à 12h de matin il y a diminution de déperditions, donc à 12h la température extérieure est égale à la température intérieure, puis de 12h jusqu'à 15h il y a des gains a travers le mur et la porte fenêtre, à 15h les gains est maximum, et après 15h il y a une diminution.

Les gains solaires à travers le mur augmentent de 8h jusqu'à atteint son maximum à 10h, puis il diminué et s'annule à 13h.

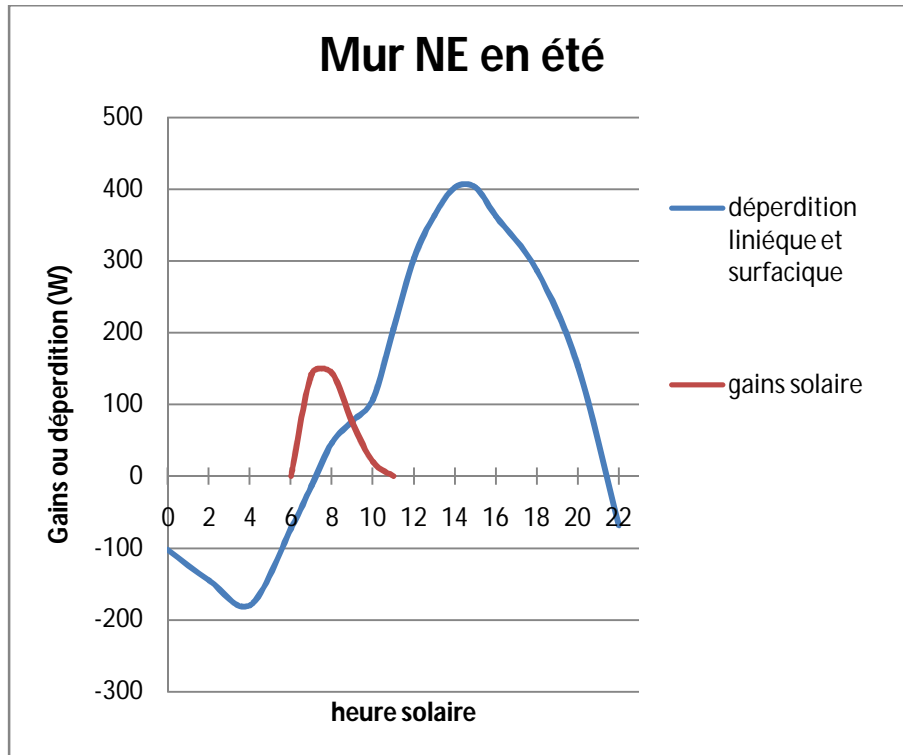


Figure 3.4 : Déperditions et Gains du mur NE en été pendant une journée

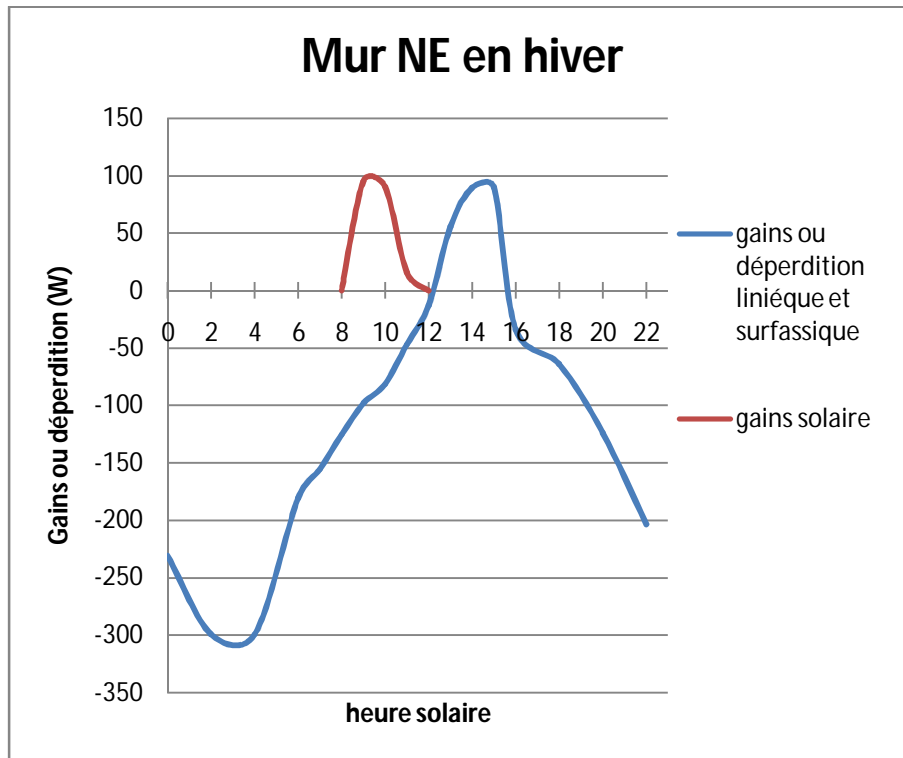


Figure 3.5 : Déperditions et Gains du mur NE en hiver pendant une journée.

Interprétation :

- ✓ Le mur Nord-Est comporte plus de gains que des déperditions pendant l'été, de 4h jusqu'à 7h de matin il y a diminution de déperditions, donc à 7h la température extérieure est égale à la température intérieure, puis de 7h jusqu'à 15h il y a des gains a travers le mur, à 15h le gains est maximum, et après 15h il y a une diminution dans les gains.
Les gains solaires à travers le mur augmentent de 6h jusqu'à atteint son maximum à 8h, puis il diminué et s'annule à 11h.
- ✓ Le mur Nord-Est comporte plus de déperditions que des gains pendant l'hiver, de 4h jusqu'à 12h de matin il y a diminution de déperditions, donc à 12h la température extérieure est égale à la température intérieure, puis de 12h jusqu'à 15h il y a des gains a travers le mur, à 15h les gains est maximum, et après 15h il y a une diminution.
Les gains solaires à travers le mur augmentent de 8h jusqu'à atteint son maximum à 9h, puis il diminué et s'annule à 12h.

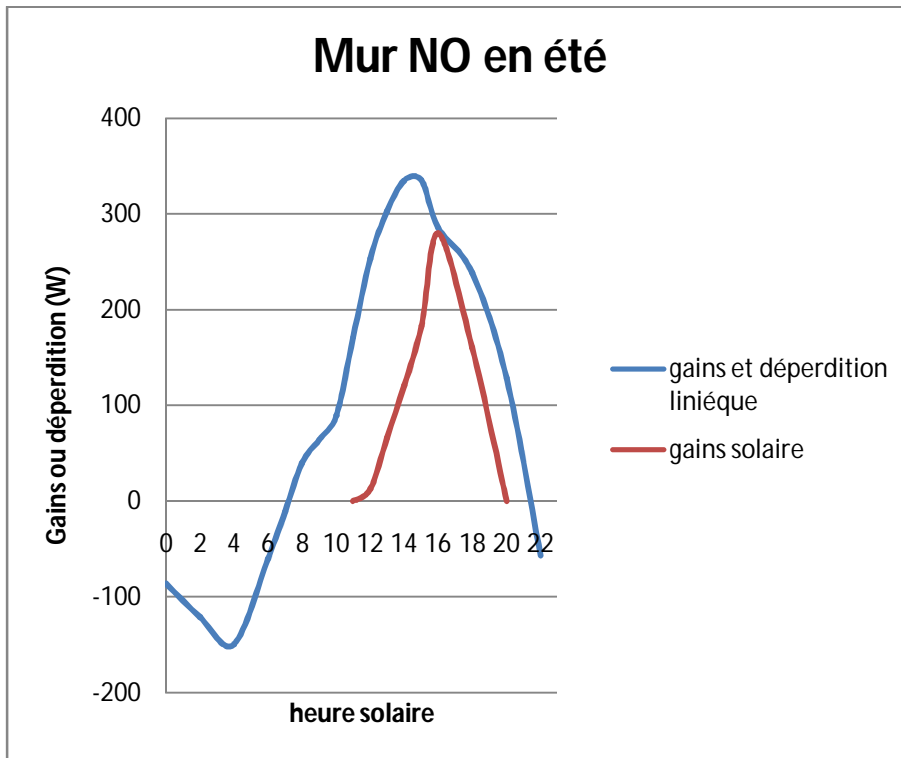


Figure 3.6 : Déperditions et Gains du mur NO en été pendant une journée

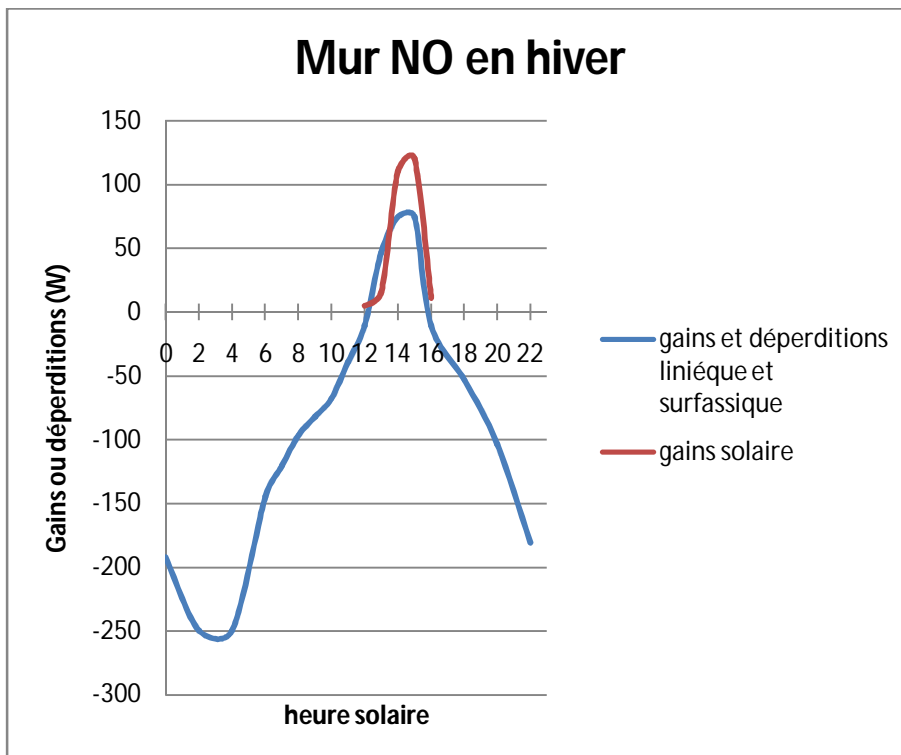


Figure 3.7 : Déperditions et Gains du mur NO en hiver pendant une journée

Interprétation :

- ✓ Le mur Nord-Oest comporte plus de gains que des déperditions pendant l'été, de 4h jusqu'à 7h de matin il y a diminution de déperditions, donc à 7h la température extérieure est égale à la température intérieure, puis de 7h jusqu'à 15h il y a des gains a travers le mur, à 15h le gains est maximum, et après 15h il y a une diminution dans les gains.

Les gains solaires à travers le mur augmentent de 11h jusqu'à atteint son maximum à 16h, puis il diminué et s'annule à 20h.

- ✓ Le mur Nord-Oest comporte plus de déperditions que des gains pendant l'hiver, de 4h jusqu'à 12h de matin il y a diminution de déperditions, donc à 12h la température extérieure est égale à la température intérieure, puis de 12h jusqu'à 15h il y a des gains a travers le mur, à 15h les gains est maximum, et après 15h il y a une diminution.

Les gains solaires à travers le mur augmentent de 12h jusqu'à atteint son maximum à 13h, puis il diminué et s'annule à 16h.

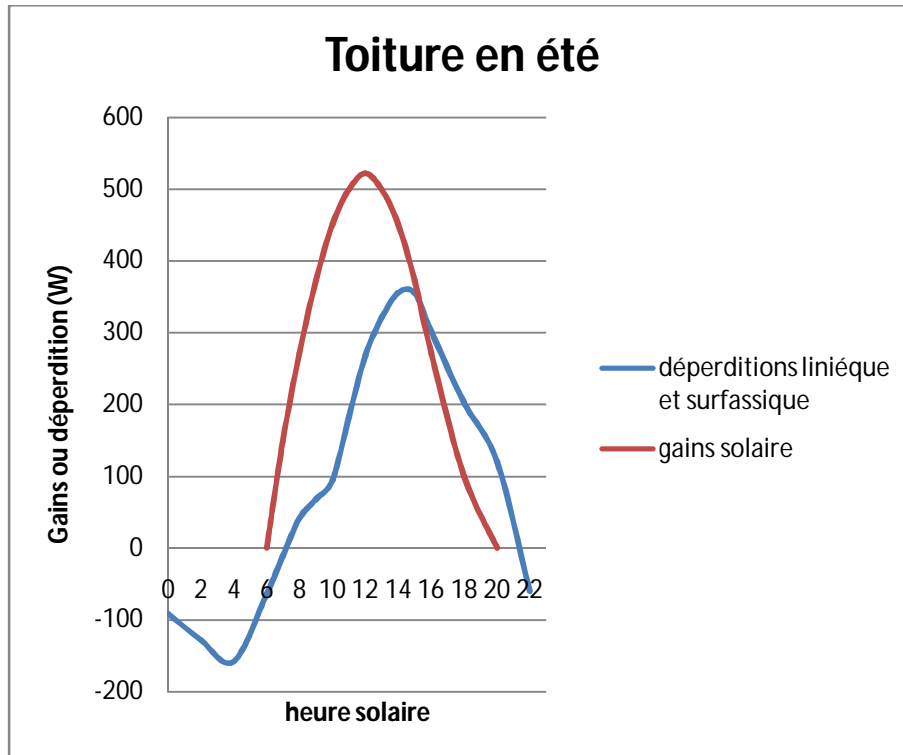


Figure 3.8 : Déperditions et Gains de la toiture en été pendant une journée

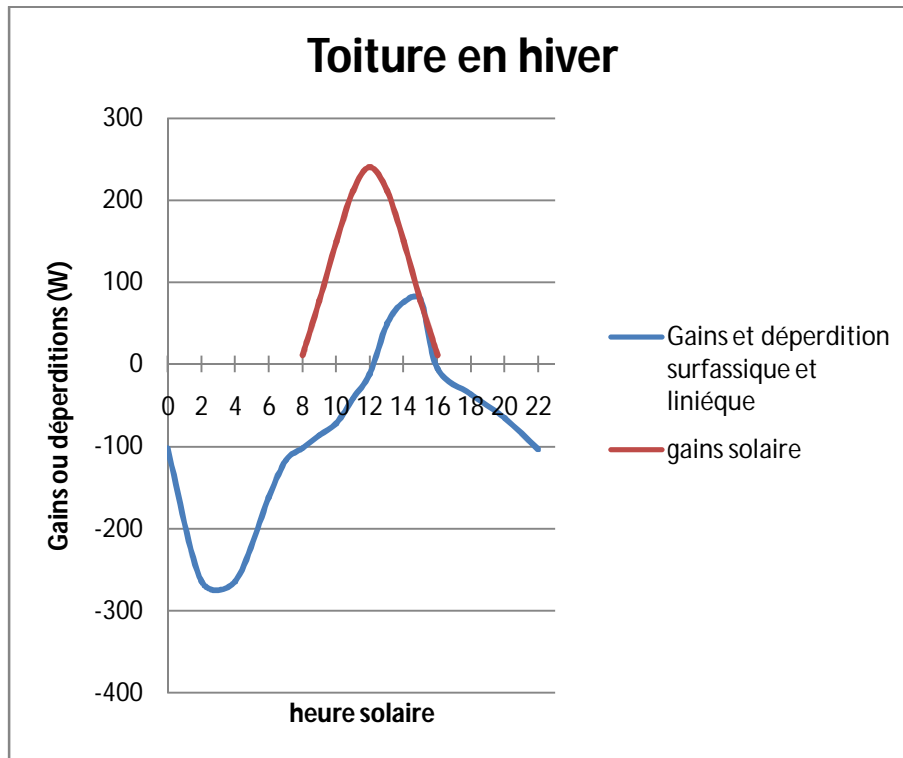


Figure 3.9 : Déperditions et Gains de la toiture en hiver pendant une journée

Interprétation :

- ✓ La toiture comporte plus de gains que des déperditions pendant l'été, de 4h jusqu'à 7h de matin il y a diminution de déperditions, donc à 7h la température extérieure est égale à la température intérieure, puis de 7h jusqu'à 15h il y a des gains a travers le mur, à 15h les gains est maximum, et après 15h il y a une diminution dans les gains. Les gains solaires à travers le mur augmentent de 6h jusqu'à atteint son maximum à 12h, puis il diminué et s'annule à 20h.
- ✓ La toiture comporte plus de déperditions que des gains pendant l'hiver, de 4h jusqu'à 12h de matin il y a diminution de déperditions, donc à 12h la température extérieure est égale à la température intérieure, puis de 12h jusqu'à 15h il y a des gains a travers le mur, à 15h les gains est maximum, et après 15h il y a une diminution. Les gains solaires à travers la toiture augmentent de 8h jusqu'à atteint son maximum à 12h, puis il diminué et s'annule à 16h.

Tableau 3.16 : Les bilans calorifiques de différentes pièces

pièce		CHAMBRE 2	CHAMBRE 3	CHAMBRE RDC	SALON	
EN ETE	Q_{tr}	Q_m	6,015	6,733	6,027	7,304
		Q_t	3,527	2,570	3,709	4,264
		Q_p	0,651	0,651	0,651	0,825
		Q_v	0,527	0,527	0,912	1,631
	Q_s	Q_m	3,175	2,295	2,548	4,159
		Q_v	2,530	2,146	1,630	2,104
		Q_t	2,477	2,382	----	----
	Q_{inf}	-4,279	-4,966	-3,767	-6,588	
	Q_{ocp}	1,984	1,984	1,984	2,976	
	Q_{ma}	1,440	1,440	1,440	1,440	
	Q_{ecl}	0,972	0,972	0,972	1,458	
	Q_T [MJ]	15,062	15,734	15,106	16,573	
	EN HIVER	Q_{tr}	Q_m	-12,386	-11,542	-10,527
Q_t			-7,312	-7,974	-6,418	-10,026
Q_p			-3,238	-3,238	-3,238	-2,825
Q_v			-2,895	-2,999	-1,596	-3,998
Q_s		Q_m	1,381	1,089	0,842	1,515
		Q_v	1,791	1,791	1,150	2,969
		Q_t	1,497	1,291	----	----
Q_{inf}		1,728	1,491	1,340	3,069	
Q_{ocp}		1,984	1,984	1,984	2,976	
Q_{ma}		1,440	1,440	1,440	1,440	
Q_{ecl}		0,972	0,972	0,972	1,458	
Q_T [MJ]		-9,821	-10,478	-10,834	-10,229	

Tableau 3.16 : Suite

pièce		CUISINE	CAGE D'ESCALIER	SALLE DE BAIN RDC	SALLE DE BAIN 1 ETAGE	
EN ETE	Q_{tr}	Q_m	3,749	5,207	4,143	4,396
		Q_t	-5,665	-3,409	2,117	2,875
		Q_P	0,825	-1,275	0,000	0,000
		Q_V	1,528	-0,069	0,050	0,050
	Q_s	Q_m	6,125	5,303	0,960	0,574
		Q_V	3,494	2,016	0,115	0,115
		Q_t	----	7,552	----	1,937
	Q_{inf}	-6,257	-2,873	-0,893	-0,893	
	Q_{ocp}	0,744	0,992	0,744	0,744	
	Q_{ma}	13,628	----	----	----	
	Q_{ecl}	0,972	2,916	0,874	0,874	
	Q_T [MJ]	19,143	16,360	8,103	10,672	
	EN HIVER	Q_{tr}	Q_m	-12,814	-17,586	-7,012
Q_t			-6,777	-8,481	1,372	-3,685
Q_p			0,825	-2,072	-3,149	-3,149
Q_V			-4,494	-1,437	-0,240	-0,240
Q_s		Q_m	0,899	1,504	0,278	0,278
		Q_V	3,519	1,866	0,001	0,001
		Q_t	----	7,226	----	4,160
Q_{inf}		1,491	1,973	0,378	0,378	
Q_{ocp}		0,744	0,992	0,744	0,744	
Q_{ma}		13,628	----	----	----	
Q_{ecl}		0,972	2,916	0,874	0,874	
Q_T [MJ]		-2,007	-9,017	-7,754	-8,208	

3.3 Interprétation des résultats

- Les grands apports de chaleur sont essentiellement dus aux transmissions surfacique et linéique à travers les murs et les toitures.
- Les chaleurs dégagées par l'éclairage et les machines sont aussi importantes vu l'équipage de chaque pièce de la maisonnette, entre autres les chambres, la cuisine, etc.
- Les apports de chaleur à travers les vitres sont aussi importants.
- Pendant l'hiver on remarque que les déperditions sont supérieures que les gains dans les chambres sauf pour la cuisine à cause de ses équipages.
- Pendant l'été on remarque qu'il y a un gain excessif dans toutes les pièces.

3.4 Conclusion

Les besoins frigorifiques sont supérieurs aux besoins calorifiques, donc notre dimensionnement des systèmes passifs de la maisonnette sera en fonction des besoins frigorifique, c'est-à-dire qu'on a besoin des systèmes passifs de refroidissement efficace.

Chapitre IV

LES SYSTEMES

PASSIFS

4.1 Installations héliothermiques

4.1.1 Le rayonnement solaire

Le rayonnement solaire qui parvient au niveau du sol peut être converti en diverses formes d'énergie, et notamment en énergie thermique. A côté des gains solaires directs qui peuvent convertir une fraction appréciable des besoins thermiques pour le chauffage, les installations héliothermiques représentent une autre variante d'utilisation thermique du rayonnement solaire.

4.1.2 Les capteurs héliothermiques

Le rôle d'un capteur solaire ou héliothermique est de transformer l'énergie électromagnétique du rayonnement solaire en énergie thermique, et ensuite de transmettre cette dernière à un fluide caloporteur. Concrètement, l'énergie solaire est absorbée par un corps, l'**absorbeur**, dans lequel (ou au contact duquel) circule le fluide à échauffer; cela peut être de l'air, de l'eau, de l'huile ou tout autre fluide. A ce titre, un simple tuyau d'arrosage exposé au soleil constitue déjà un capteur solaire.

Ce corps (l'absorbeur) doit donc avoir un bon coefficient d'absorption pour le rayonnement solaire et est, de ce fait, noir à nos yeux et dans le proche infrarouge (en fait dans la bande des 0,4 à 2,5 microns de longueur d'onde). De plus, l'absorbeur doit avoir un bon contact thermique avec le fluide caloporteur. Autour de l'absorbeur, divers dispositifs sont placés pour diminuer les pertes de chaleur qui ne seraient pas transmises au fluide et pour augmenter le niveau de température.

Ayant augmenté sa température, l'absorbeur va également dissiper une partie de son énergie thermique vers l'extérieur; afin de diminuer ces pertes et d'augmenter le niveau de température, l'absorbeur est généralement placé dans une enceinte vitrée tel que schématisé sur la Figure 4.1.

Le verre, qui ferme cette enceinte, présente cette particularité d'être transparent au rayonnement solaire mais quasiment opaque à la chaleur (rayonnement infrarouge de grande longueur d'onde).

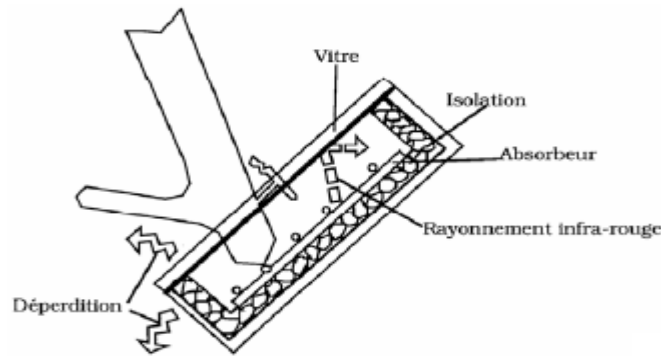


Figure 4.1:Schéma de principe d'un capteur solaire plan.

Ainsi le rayonnement solaire pénètre dans le capteur et se transforme en chaleur au contact de l'absorbant qui s'échauffe. Le rayonnement infrarouge émis par ce dernier, ne peut traverser le verre. L'énergie se trouve ainsi piégée dans le capteur dont la température s'élève. On parle de l'effet de serre par analogie aux constructions vitrées utilisées en horticulture pour obtenir par ce moyen une température plus élevée favorable à la croissance des plantes.

Les types de capteurs

Suivant le fluide caloporteur ou la géométrie du capteur, on peut distinguer plusieurs grandes catégories de capteurs solaires :

- Selon le fluide caloporteur : les capteurs à eau, à air, à huile, à ébullition.
- Suivant la géométrie du capteur: les capteurs plans ou à concentration. Les capteurs à concentration permettent d'obtenir de hautes températures mais ne captent que le rayonnement solaire direct (Figure 4.2). Les capteurs plans atteignent des températures moyennes mais captent la totalité du flux solaire (Figure 4.3).

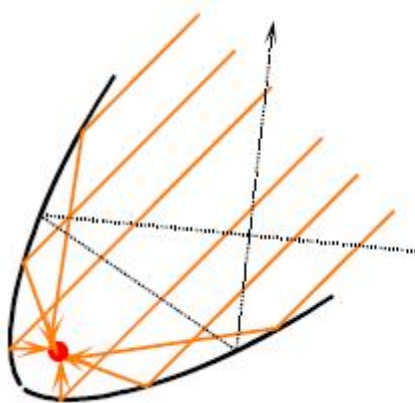


Figure 4.2: Capteur à concentration.

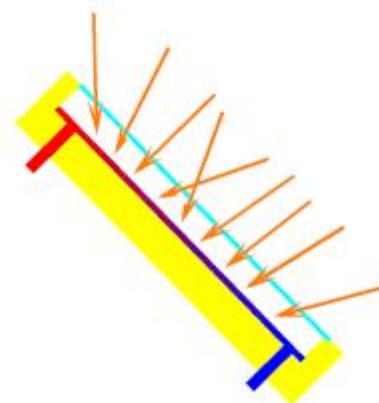


Figure 4.3: Capteur plan.

Les critères présidant au choix d'un capteur peuvent être les suivants :

- Le niveau de température désiré peut-il être fourni dans de bonnes conditions ?
- Est-il possible d'intégrer facilement les capteurs sur le site envisagé (sur un toit plat, intégré en toiture, posé sur le sol, etc.)
- Le capteur a-t-il de bonnes performances, soit un bon coefficient d'absorption global ou coefficient d'échange rayonnement solaire-fluide caloporteur et un faible facteur de pertes à la température envisagée?
- Les matériaux de l'absorbeur sont-ils compatibles avec le fluide caloporteur?
- Les matériaux de couverture et du boîtier résisteront-ils à l'environnement prévu?
- La durée de vie estimée est-elle suffisante? Quelles sont les garanties?
- Le prix est-il acceptable?

D'autres propriétés doivent être connues et examinées au niveau de la conception:

- Le capteur résiste-t-il à la pression prévue dans le circuit solaire?
- Les pertes de charge du capteur sont-elles compatibles avec la pompe prévue?
- La capacité thermique du capteur est-elle assez faible?

4.1.3 Installations thermosolaires

Il a été vu au paragraphe précédent que bien qu'étant fondamentalement simple, le bon fonctionnement d'un système solaire nécessite quelques précautions.

Un autre problème inhérent à l'utilisation de l'énergie solaire est sa disponibilité temporelle; grossièrement exprimé, le soleil fournit le moins d'énergie précisément lorsque les besoins thermiques sont les plus grands, c'est-à-dire pendant les mois d'hiver, lors des jours de mauvais temps, et en soirée. Il faut donc avoir recours à des capacités de stockage capables de restituer cette chaleur avec un certain déphasage. Si techniquement il est possible de couvrir la totalité des besoins annuels en chaleur par une installation composée de capteurs solaires et d'accumulateurs uniquement, il n'en va pas de même du point de vue économique. Pour pallier à ce handicap, on a donc généralement recours à des systèmes combinés avec une autre source d'appoint.

Une installation solaire se présente pratiquement toujours selon la Figure 4.4 des transformations de forme d'énergie ont lieu au captage. L'accumulation sert à adapter l'offre à la demande, l'appoint doit couvrir le manque d'offre éventuel, et la régulation (R)

doit gérer le tout de façon que l'installation solaire fournisse le maximum d'énergie utile possible et que les flux d'énergie aillent toujours dans le sens des flèches. Les lignes pointillées montrent les relations des éléments du système avec la régulation (R) [6].

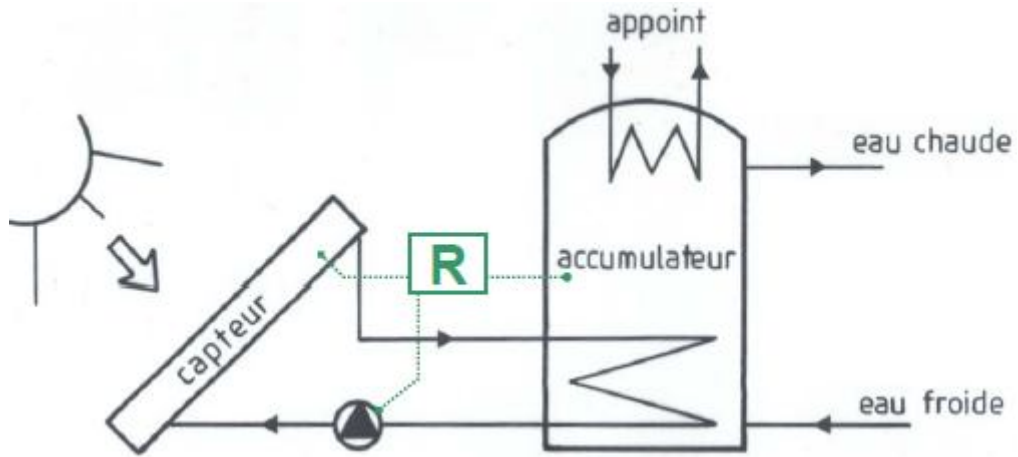


Figure 4.4: Schéma de principe d'une installation solaire.

4.1.4 Murs capteurs

Le rayonnement solaire est valorisé par effet de serre, en disposant un vitrage devant un mur en béton.

L'énergie solaire est transmise par conduction à travers le mur puis par rayonnement à l'air de la pièce. Cette transmission se fait avec un déphasage pouvant atteindre 11 heures si l'épaisseur de béton est de 40 cm. Ce déphasage permet de chauffer la pièce au moment où il n'y a plus de soleil.

En raison des pertes, le mur capteur ne restitue pas la nuit toute l'énergie reçue durant la journée. Afin de limiter ces pertes, il faut prévoir une isolation nocturne ou mettre en œuvre un double vitrage.

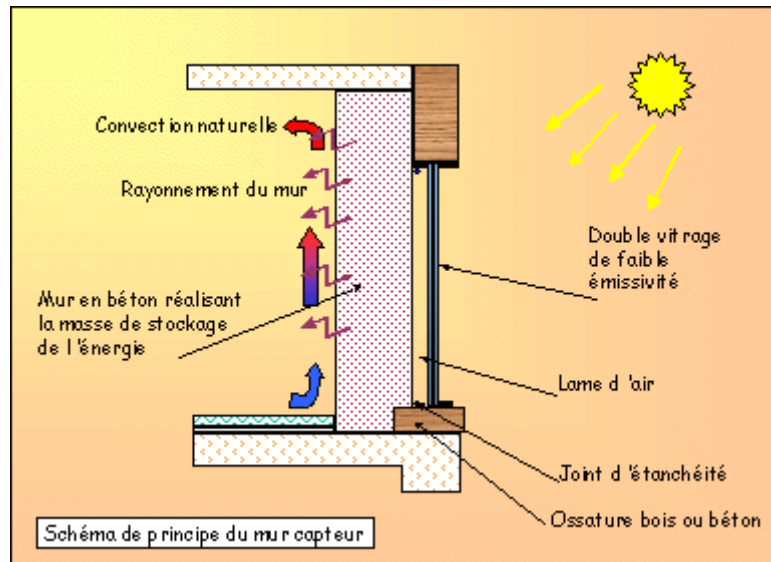


Figure 4.5: Schéma de principe du mur capteur.

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

✓ **L'appoint de chauffage pour le mur capteur**

Bien dimensionné dans un projet d'architecture, en allège, le mur capteur associé à un vitrage couvre tous les besoins d'une pièce, pour une journée de chauffe si celle-ci est ensoleillée. Le vitrage valorise les apports directs, le mur capteur restitue avec un déphasage l'énergie stockée pendant la journée. Un appoint est cependant nécessaire :

- si la journée est nuageuse,
- dans les pièces orientées au nord.

Trois solutions sont envisageables :

- Solution électrique (investissement faible): Le confort sera amélioré par un plancher électrique rayonnant ou des panneaux radiants
- Chauffage central (investissement supérieur) au gaz ou au fioul
- Poêle à bois continu. Permet de conserver une image bioclimatique au bâtiment

✓ **Critères de choix**

1. Aspect environnemental

- valorisation de l'énergie solaire à moindre coût par rapport aux installations de capteurs solaires,
- généralement associé à d'autres procédés de chauffage basse consommation, dans le cadre d'une démarche d'architecture.

2. Géographiques et climatiques

- orientation : sud avec une tolérance de 15° de part et d'autre,
- régions à forte amplitude thermique jour/nuit : Provence et zones de montagne ensoleillées,
- altitude : plus l'altitude est importante et meilleure sera l'efficacité du mur capteur.

3. Types de bâtiments

- Maisons individuelles.

✓ **Éléments de pré-dimensionnement**

La surface

Pour une pièce de hauteur normale, il faut prévoir une surface de mur capteur égale à 10 % de sa surface habitable.

Ainsi, on réalise, sur un bilan annuel, environ 30 % d'économies d'énergie. Par temps ensoleillé, cette surface de mur capteur sera suffisante pour couvrir la totalité des besoins de chauffage.

L'épaisseur du mur

L'épaisseur de béton et le temps d'ensoleillement conditionnent la bonne efficacité du mur.

Le mur doit fournir l'inertie et la masse suffisante pour couvrir les besoins.

Épaisseur optimale : 20 à 30 cm.

Si le mur est trop épais, de l'ordre de 40 cm, il risque de ne pas pouvoir se chauffer suffisamment durant une journée d'hiver ensoleillée où l'on peut compter sur environ 5 h d'ensoleillement efficace.

Si le mur est trop fin, les déperditions sont trop importantes et ne peuvent être couvertes par le mur.

Éléments de calcul

La paroi considérée est constituée d'une partie opaque intérieure, comme un mur en béton, d'un vitrage extérieur, et entre les deux d'une lame d'air non ventilée. Le facteur de transmission s'exprime ainsi :

$$F_{ts} = S \cdot \alpha \cdot \frac{U}{\chi_e} \quad (4.1)$$

✓ Mise en œuvre

Disposition.

Disposition indifféremment verticale (mur plus haut que large) ou horizontale (mure plus large que haut). La disposition horizontale permet de profiter d'une surface supplémentaire pour mettre en place des vitrages ouvrants ou non au-dessus du mur capteur.

Constitution.

Un mur capteur est constitué :

- d'un double vitrage de faible émissivité,
- d'une lame d'air,
- d'un joint d'étanchéité,
- d'un mur réalisant la masse de stockage de l'énergie en béton ; par exemple, des blocs de parement montés à l'envers, remplis de béton et recouverts d'une couche de peinture marron.

L'utilisation de blocs de parement permet de concilier :

- un coût en matériau peu élevé,
- une facilité de mise en œuvre et des coûts de main d'œuvre raisonnables.

De cette façon, le mur capteur n'est guère plus cher qu'un mur traditionnel.

Ordre des interventions.

Quelques précautions sont à prendre dans l'ordre des interventions :

1. Mise en place de l'ossature en bois ou en béton,
2. Intervention du maçon pour construire le mur,
3. Intervention du peintre, afin d'assombrir la surface extérieure du mur,
4. Réalisation de l'étanchéité, à l'aide d'un joint en silicone, dans ce qui sera la lame d'air, pour supprimer tout échange entre l'air de l'intérieur et l'air de la lame d'air. Ce joint résout aussi les éventuels problèmes de poussières dans la lame d'air,
5. Intervention du vitrier.

Surchauffe.

Dès la conception, il est nécessaire de penser aux possibles problèmes de surchauffe.

En été, le rayonnement solaire est moins incident sur des surfaces verticales qu'en hiver. Mais il est tout de même important, dans la mesure du possible, d'intégrer dès la conception, dans le projet architectural, des avancées à l'aide de balcons, de pergolas, qui permettent l'ensoleillement direct en hiver et le limitent en été.

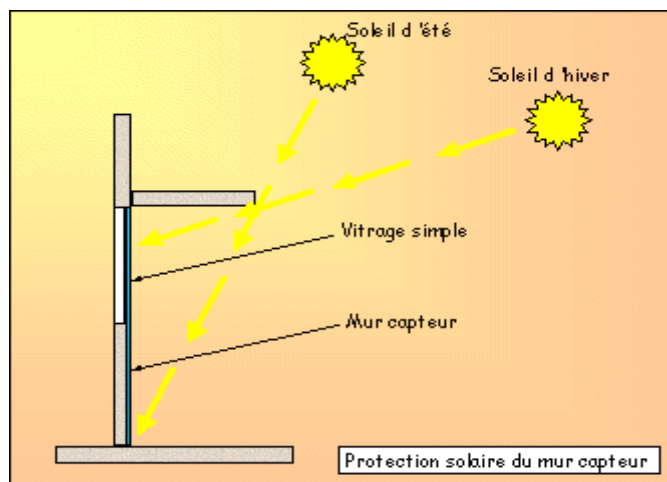


Figure 4.6: Protection solaire du mur capteur.

Des solutions plus anecdotiques et moins esthétiques sont de protéger le vitrage à l'aide d'une bâche, d'un lait de chaux ou de canisses.

Revêtement intérieur

Tout type de revêtement intérieur (tapisserie, peinture, plâtre, fresque à la chaux...) peut être mis en œuvre dans la mesure où il n'est pas trop isolant.

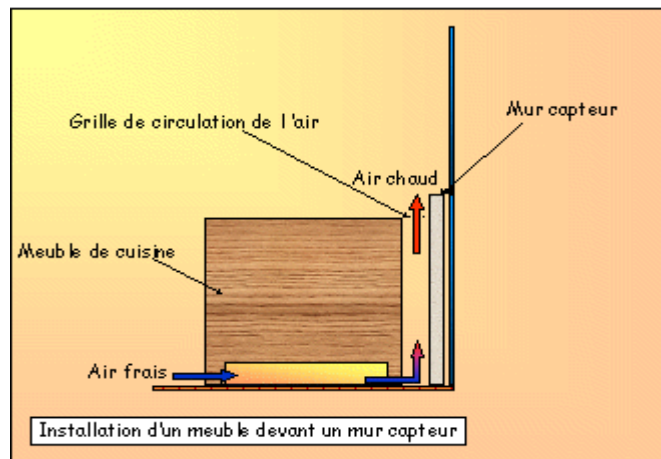


Figure 4.7: Installation d'un meuble devant un mur capteur.

Pour placer des meubles devant le mur, il est impératif de permettre la circulation de l'air devant celui-ci, comme le montre le schéma ci-dessus.

Isolation

Pour conserver la performance du mur, il est contre-indiqué de mettre en œuvre une isolation. Les apports sont suffisants pour ne pas avoir une impression d'inconfort [9].

4.2 Refroidissement et climatisation à basse consommation d'énergie

Le conditionnement d'air présente plusieurs inconvénients:

- Il est souvent mal accepté par les occupants et est souvent accusé de tous les maux.
- Il fonctionne mal ou pas du tout lorsque les fenêtres sont ouvertes.
- Il consomme de grandes quantités d'électricité pour faire mouvoir l'air.
- Les mouvements d'air dans les conduites et au travers de bouches de pulsion et d'extraction engendrent du bruit, notamment des infrasons inconfortables, voire nuisibles.

Pour toutes ces raisons, d'ordre aussi bien sociologique et économique qu'énergétique, il est intéressant d'examiner la possibilité de refroidir les bâtiments par d'autres méthodes.

4.2.1 Parois climatiques

La climatisation par parois radiantes (verticales ou horizontales) se développe de plus en plus, en particulier dans les immeubles commerciaux et administratifs. Cette technique

permet de diminuer la consommation d'énergie pour le chauffage et le rafraîchissement, grâce aux avantages suivants:

- L'énergie thermique est transportée avec de l'eau, avec un débit volumique 4000 fois plus faible qu'un débit d'air transportant la même quantité de chaleur.
- La température de fonctionnement est proche de la température de consigne: l'eau de chauffage est à quelques degrés au-dessus de la température ambiante, et l'eau de refroidissement à quelques degrés au-dessous de l'ambiance. Ceci permet l'utilisation de chaleur de récupération, de sources d'énergie renouvelables, ou de refroidir sans machine frigorifique (eau de nappe, de source, ou de lac); et diminue les déperditions dans les conduites.
- Les conditions de confort sont atteintes même si l'air ambiant est plus chaud (en été) ou plus froid (en hiver) que la température opérative requise. Une nette amélioration du confort peut même être obtenue avec les fenêtres ouvertes [6].



Figure 4.8: Plafond climatique dans une salle de conférence.

4.2.2 Mur Trombe

Il s'agit d'un vitrage suivi d'une lame d'air et d'un mur en béton.

Des ouvertures hautes et basses sont réalisées dans le mur afin de créer une circulation d'air par thermosiphon entre la lame d'air et l'air du local à chauffer.

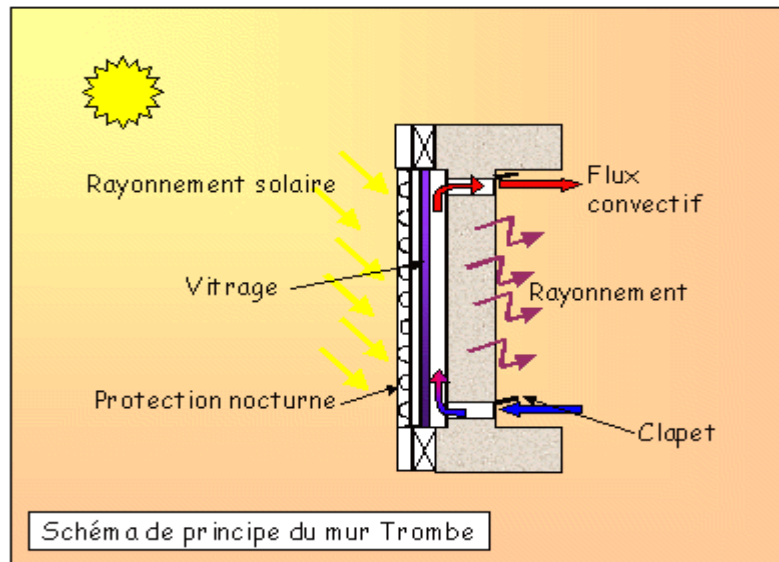


Figure 4.9: Schéma de principe du mur capteur.

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

En l'absence de rayonnement solaire, le flux convectif s'inverse pouvant provoquer un refroidissement accéléré de la pièce. Pour éviter cela, il est alors nécessaire de disposer des clapets à fermeture manuelle ou automatique.

✓ **Éléments de pré-dimensionnement**

Ouvertures

La surface totale des ouvertures supérieures et inférieures doit représenter 3 % de la surface totale du mur Trombe.

On peut augmenter de 10% maximum la surface des ouvertures supérieures si on tient compte de la dilatation de l'air lorsqu'il circule entre le mur et le vitrage.

✓ **Mise en œuvre**

Il est essentiel de prévoir des clapets devant les ouvertures du mur dans le but d'éviter une circulation inverse de l'air lorsque l'ensoleillement est insuffisant. Sinon cela provoquerait un refroidissement du local.

Mais cette obturation manuelle est contraignante pour l'occupant. En particulier en cas de longue absence, il est préférable de fermer les clapets.

Pour améliorer l'installation, elle peut être automatisée. Ainsi l'ouverture des clapets est commandée dès que l'ensoleillement est suffisant et inversement pour la fermeture. Mais il faut faire attention à ce que l'automatisation n'engendre pas un surcoût trop important [9].

4.3 Les puits canadiens/provençaux

Il s'agit d'un système dit géothermique qui utilise l'énergie présente dans le sol à proximité de sa surface pour chauffer ou refroidir l'air neuf de ventilation des bâtiments en s'appuyant sur le constat suivant : la température de l'air extérieur peut varier de -2°C à +40°C tout au long de l'année alors que la température du sol à quelques mètres de profondeur reste plus stable, entre 5 et 15°C en moyenne suivant les saisons.

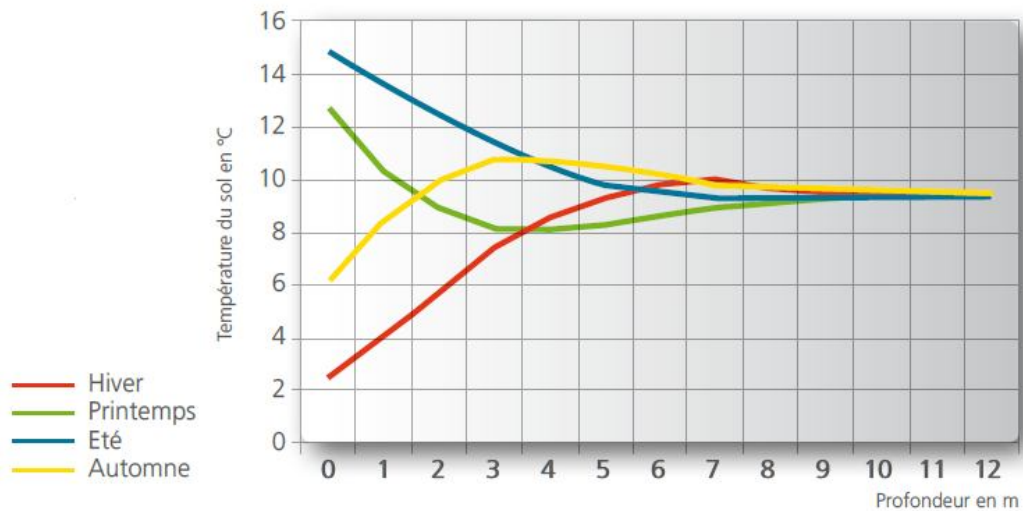


Figure 4.10 : la variation de la température du sol en fonction de la profondeur.

Le principe du puits canadien/provençal est de faire circuler l'air neuf de ventilation dans un conduit enterré grâce à un ventilateur, avant de l'insuffler dans le bâtiment. En hiver, l'air se réchauffe au cours de son parcours souterrain, les besoins de chauffage liés au renouvellement d'air des locaux sont alors réduits et le maintien hors gel du bâtiment peut être assuré. Le puits est alors dit puits canadien. En été, l'air extérieur profite de la fraîcheur du sol pour se refroidir et arriver dans le bâtiment durant la journée à une température inférieure à la température extérieure. Le puits est alors dit puits provençal.

Les 4 principaux éléments d'un puits canadien/provençal

1. Entrée d'air neuf.
2. Conduit.
3. Système d'évacuation des condensats.
4. Ventilateur et système de régulation du puits.

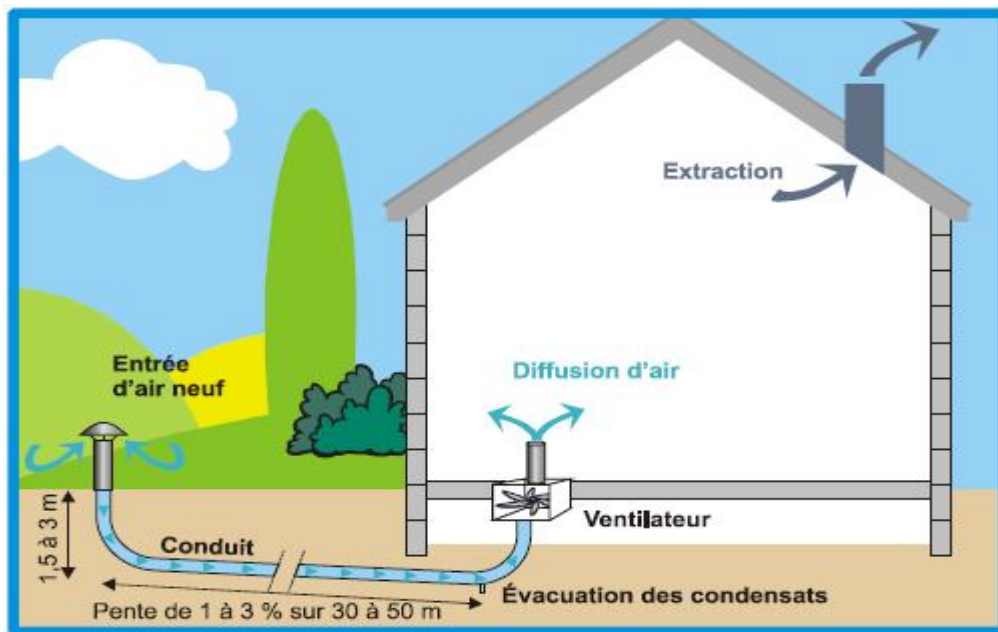


Figure 4.11: Principe du puits canadien/provençal.

Eléments de conception

- ✓ **Nature du sol** : c'est un des principaux éléments à prendre en compte lors de la conception d'un puits canadien/provençal. Les performances du puits sont directement liées à la capacité calorifique et à la conductivité thermique du sol.

✓ **Conductivité thermique du sol**

La conductivité thermique d'un sol dépend non seulement de sa composition mais également de la disposition et de la forme de ses particules constitutives, des liaisons entre ces particules ainsi que de sa teneur en eau. Le sol sera d'autant plus conducteur de chaleur qu'il sera humide. La conductivité thermique d'un sol peut donc varier dans le temps, notamment en fonction des évolutions de sa teneur en eau dues aux variations climatiques et au changement de saison.

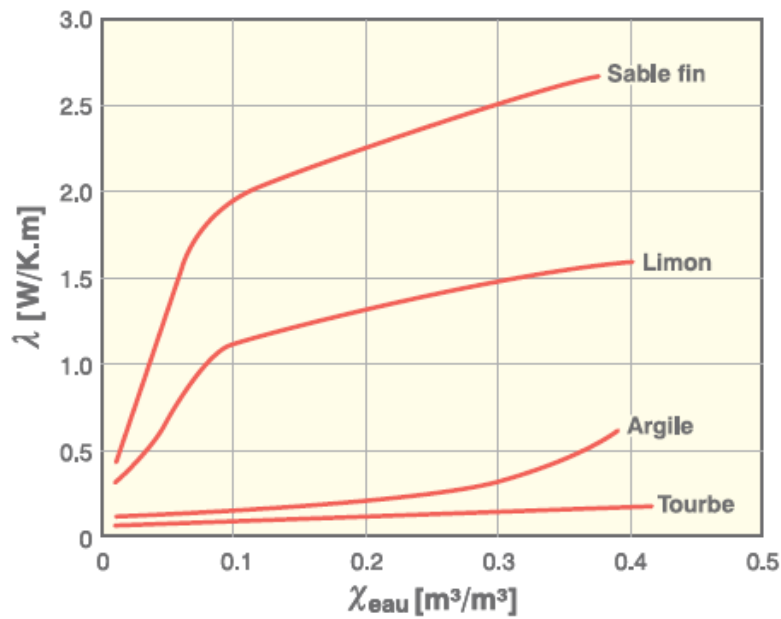


Figure 4.12: la conductivité thermique de différents types de sols en fonction de leur teneur en eau.

✓ **Capacité calorifique du sol**

La capacité calorifique C_s d'un sol s'exprime par la moyenne pondérée des capacités calorifiques de ses constituants : minéraux, matière organique, eau, air :

$$C_s = \sum_i \chi_i \rho_i C_i \quad (3.2)$$

Comme l'eau et la matière organique ont une capacité calorifique supérieure à celle des éléments minéraux, un sol humide et riche en matière organique stockera mieux la chaleur qu'un sol sec, riche en minéraux.

Le tableau suivant montre les propriétés thermiques des principaux constituants d'un sol :

Tableau 4.1 : *Propriétés thermiques des principes constituants d'un sol.*

Matière	$\rho(\text{kg}/\text{m}^3)$	$C(\text{kJ}/\text{Kkg})$	$\lambda(\text{W}/\text{Km})$
Minéraux (moy)	2650	0,80	2,90
Sable et Gravier	1700 à 2200	0,91 à 1,18	2,00
Argile et Limon	1200 à 1800	1,67 à 2,50	1,50
Matière organique	1300	1,90	0,25
Eau	1000	4,20	0,585
Glace	920	2,10	2,20
Air	1250	1,00	0,023

- ✓ **Localisation géographique** : le recours à un puits canadien/provençal est particulièrement intéressant dans les régions ayant un différentiel de température important entre l'été et l'hiver (>20 °C).
- ✓ **Place disponible pour l'enfouissement du conduit et coût** : lors de la conception d'un puits canadien/provençal, il est préférable pour l'enfouissement du conduit de disposer d'une surface importante et dégagée. De plus, le coût d'installation d'un puits canadien/provençal dépend fortement du coût de terrassement.

Ces deux éléments font qu'il est plus judicieux d'installer le puits pendant les travaux de fondation d'un bâtiment que pour équiper un bâtiment existant.

- ✓ **Type de bâtiment et ventilation hygiénique** : le puits canadien/provençal doit permettre au système de ventilation de l'habitation d'assurer un débit d'air pour les bâtiments résidentiels. Ce débit dépend de la configuration de chaque bâtiment.
- ✓ **Besoins en chauffage et refroidissement** : une étude thermique permet, en fonction des conditions climatiques et des besoins de chauffage et de refroidissement d'un bâtiment, de déterminer les principales caractéristiques que doit avoir le puits [10].

Chapitre V

DIMENSIONNEMENT DES SYSTEMES PASSIFS

5.1 Introduction

Le contrôle de l'environnement intérieur des locaux ne peut être efficace que si la puissance de l'installation est suffisante pour compenser à chaque instant aussi bien les charges maximales que les charges intermédiaires.

En fonction de la nature du sol de la région d'Alger qui 'est constituée de l'argile et de limon, et des conditions métrologiques, nous avons choisi d'installer des systèmes de refroidissement et de chauffage passifs. Le choix est porté sur les puits canadiens et les murs trombes à cause de leur double fonction, qui est le chauffage pendant l'hiver et le refroidissement pendant l'été. Avant de faire ce choix, nous avons étudié les différents systèmes passifs. Nous présentons dans ce chapitre le dimensionnement des systèmes adoptés selon le besoin précédemment évalué dans la partie bilan énergétique de l'habitation.

5.2 Dimensionnement et mise en œuvre du puits canadien

5.2.1 Entrée d'air neuf

✓ Type d'entrée

Il s'agit généralement d'une bouche extérieure pour le secteur.

✓ Hauteur de la prise d'entrée d'air neuf

Elle doit être supérieure à 1,10 m pour limiter l'encrassement.

✓ Chapeau de protection

Il permet d'éviter les infiltrations d'eau de pluie à l'intérieur du puits.

✓ Grille de protection à fin maillage

Elle est indispensable pour éviter l'intrusion de rongeurs, oiseaux, insectes. Elle doit être facilement accessible pour nettoyage.

✓ Filtres

Il est conseillé de munir les entrées d'air des puits canadiens/provençaux d'un filtre. La classe du filtre à utiliser dépend de la densité et du type de poussières à proximité de l'entrée d'air. Il est recommandé d'inspecter et de changer régulièrement les filtres (3 à 4 fois par an en moyenne) car un filtre encrassé contribue à augmenter les pertes de charge du puits et donc la consommation du ventilateur.

✓ **Positionnement de l'entrée d'air neuf**

Celle-ci doit être implantée loin des sources de pollution (voirie, parking, poubelles) et loin de toute végétation pouvant produire des pollens allergisants.

5.2.2 Conduit

✓ **Nombre de tubes**

Le conduit du puits peut être constitué d'un seul tube posé en méandre ou en boucle autour du bâtiment ou être organisé sous la forme d'un réseau de tubes parallèles installés entre des collecteurs afin d'augmenter le débit d'air circulant dans le puits.

✓ **Longueur de chaque tube**

Elle est habituellement de l'ordre de 30 à 50 m afin de limiter les pertes de charge. La longueur totale du conduit est calculée en fonction du débit d'air souhaité, de la nature du sol, de la zone géographique (température extérieure tout au long de l'année) et du type d'installation choisie.

✓ **Diamètre des tubes**

Pour optimiser les transferts thermiques sol/air, la vitesse de l'air au sein du puits doit être comprise entre 1 et 3 m/s. En fonction des débits d'air requis, le diamètre du conduit du puits est alors calculé pour respecter ces conditions de vitesse d'air.

✓ **Disposition des tubes**

Afin de minimiser les pertes de charge au sein du conduit et de faciliter son entretien, il est conseillé de limiter le nombre de coudes. Deux dispositions sont majoritairement utilisées lorsque le puits ne comporte qu'un seul tube :

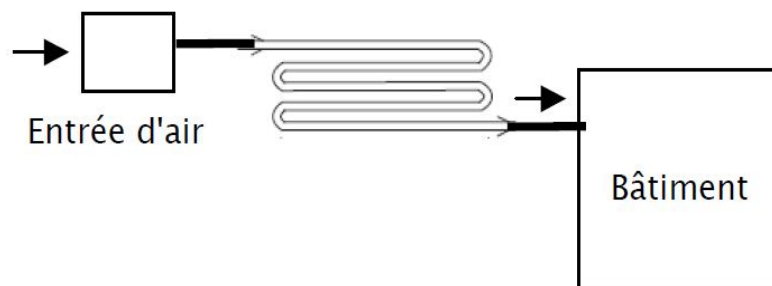


Figure 5.1 : Tube en méandre

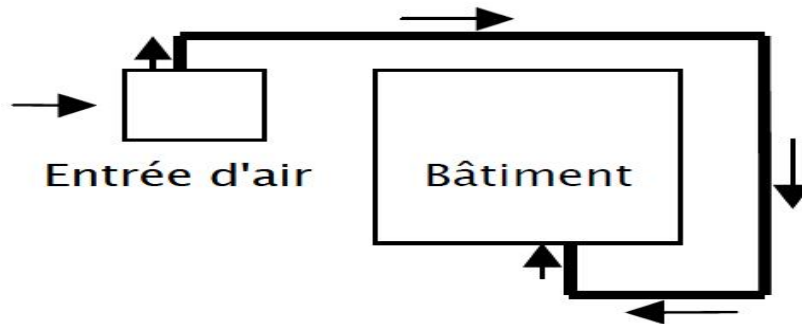


Figure 5.2 : Tube en boucle

La disposition souvent utilisée lorsque le puits est constitué d'un faisceau de tubes est la suivante :

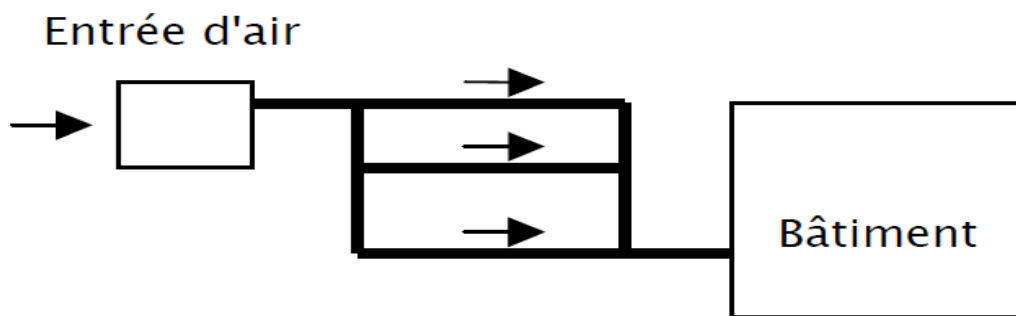


Figure 5.3 : puits constitué d'un faisceau de tubes.

✓ Profondeur d'enfouissement des tubes

La profondeur préconisée est souvent comprise entre 1,5 et 3 m. A ces profondeurs, la température du sol varie bien moins que la température de l'air extérieur entre l'été et l'hiver (entre 5 et 15 °C en moyenne). Il est cependant possible d'enfouir les tubes plus profondément mais cela augmente les contraintes de terrassement et de pose du conduit.

✓ Espacement entre les tubes

il est préférable qu'il soit supérieur à 3 fois le diamètre des tubes afin de garantir un bon échange thermique de chaque tube avec le sol.

✓ Pente du conduit

Elle doit être comprise entre 1 et 3% pour favoriser l'évacuation des condensats qui peuvent se former dans le conduit lorsque l'air extérieur chaud est en contact avec les parois plus froides du puits.

✓ Matériau constitutif des tubes

Le choix du matériau est important car il impacte directement sur les échanges thermiques sol/puits. L'utilisation de parois compactes à conductivité thermique élevée doit être favorisée car elle permet d'augmenter les échanges et ainsi de réduire la longueur

du puits. Les matériaux utilisés doivent également avoir une bonne tenue à l'enfouissement (une classe de rigidité minimale de 8 kN/m^2 est conseillée). Les tubes entrant dans la composition des puits canadiens/provençaux actuellement en fonctionnement sont généralement en PVC, en polyéthylène ou en polypropylène souple ou rigide. Certains tubes sont constitués de matières plastiques (PVC structurés ou gaines type TPC) emprisonnant des bulles d'air, ce qui diminue l'échange thermique sol/conduit. Le recours à ce type de tube est donc déconseillé.

✓ **Étanchéité du réseau (tubes et raccords)**

Elle est indispensable pour empêcher la pénétration de racines ainsi que les phénomènes d'infiltration d'eau au sein du conduit. Une étanchéité des jonctions conforme aux exigences est recommandée.

✓ **Traitement anti-microbien**

Les tubes du conduit peuvent avoir subi un traitement permettant de freiner la prolifération microbienne, source de mauvaise odeur dans les bâtiments et de dégradation de la qualité de l'air intérieur. L'emploi de sel d'argent est par exemple un excellent traitement antimicrobien.

✓ **Entretien du puits**

Il doit être régulier (1 à 2 fois par an) et doit comporter le remplacement des filtres de la bouche d'entrée d'air neuf, l'inspection de l'intérieur du conduit pour vérifier le bon écoulement des condensats et le contrôle de l'état général du puits.

5.2.3 Système d'évacuation des condensats

La vapeur d'eau contenue dans l'air qui circule dans le conduit enterré peut se condenser en fines gouttelettes lorsque celui-ci est en contact avec les parois intérieures froides du puits. La stagnation de cette eau de condensation au sein du puits favorise le développement de germes et de bactéries, peut perturber la circulation et altérer la qualité de l'air neuf dans le puits. Afin d'éviter ces phénomènes, le puits, dont le conduit est incliné, doit impérativement être muni d'un système d'évacuation des condensats. La structure de ce système dépend de la présence ou non d'un sous-sol au sein du bâtiment :

✓ **Présence d'un sous-sol**

La récupération des condensats peut alors se faire dans le sous-sol. Ils sont ensuite évacués vers l'égout à l'aide d'un siphon, ce qui permet une étanchéité parfaite du puits

depuis l'entrée d'air neuf jusqu'au système de ventilation. Cette solution est donc à privilégier dans les zones où le sol entourant le puits est très humide.

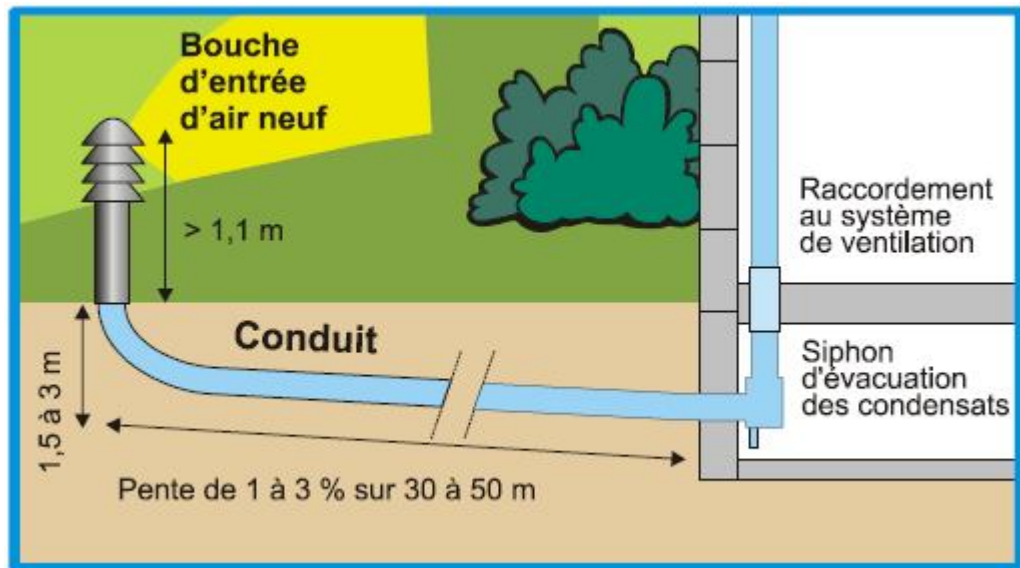


Figure 5.4 : système d'installation du puits en cas de présence d'un sous-sol

✓ **Absence de sous-sol**

Un regard de visite doit être placé à l'endroit le plus bas du puits (sous la bouche d'entrée d'air si le conduit est montant, à l'extrémité du conduit côté bâtiment si celui-ci est descendant) afin d'évacuer les condensats soit par infiltration dans le sol à l'aide d'un lit de cailloux, soit en utilisant une pompe de relevage. Ce regard permet également d'inspecter visuellement le conduit afin de déceler d'éventuels problèmes et de procéder à l'entretien du puits.

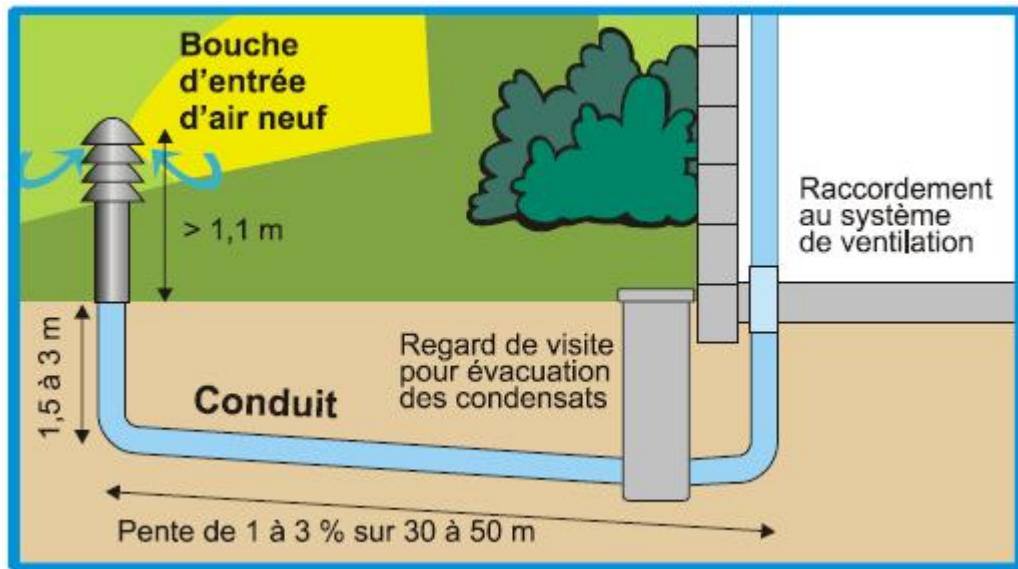


Figure 5.5 : système d'installation du puits en cas d'absence d'un sous-sol

5.2.4 Ventilateur et système de régulation

✓ Performance

Le ventilateur doit être dimensionné en fonction du débit d'air neuf nécessaire. Il doit avoir un rendement suffisant pour ne pas dégrader le facteur de performance du puits.

✓ By-pass et thermostat

En intersaison, lorsque la température extérieure est comprise entre 10 et 20 °C, le recours au puits canadien/provençal n'est pas judicieux. En effet, la température extérieure est bien souvent proche de la température de confort intérieur se situant entre 18 et 22 °C, il est donc préférable de déconnecter le puits par un by-pass afin de ne pas rafraîchir l'habitation. Le by-pass permet alors de contourner le puits par une prise directe d'air neuf. Il est généralement piloté par un servomoteur, couplé à un thermostat positionné à l'extérieur du bâtiment, ce qui permet de faire varier la nature de l'injection d'air neuf : injection d'air provenant du puits ou injection directe d'air extérieur en fonction de la pertinence du passage par le puits [10].

5.3 Dimensionnement de l'installation

5.3.1 Calcul de débit volumique de soufflage de chaque pièce

Pour calculer le débit volumique de soufflage il faut faire le bilan de chaque pièce

La charge apportée au local par l'air soufflé et les apports calorifique ou frigorifique intérieur est égale à la charge perdue par ce local

Ecrivons que la charge gagnée est égale à la charge perdue par le local

$$H_1 = H_2 \quad (5.1)$$

Avec
$$H_1 = h_1 \cdot q_{m_{as}} + H_0 \quad (5.2)$$

Et
$$H_2 = h_2 \cdot q_{m_{as}} \quad (5.3)$$

$$h = \theta + r(2490 + 1,96 \cdot \theta) \quad (5.4)$$

$$v = 462(0,622 + r) \frac{T}{P} \quad (5.5)$$

Le bilan du local est par conséquent :

$$h_1 \cdot q_{m_{as}} + H_0 = h_2 \cdot q_{m_{as}} \quad (5.6)$$

$$q_{m_{as}} = \frac{H_0}{h_2 - h_1} \quad (5.7)$$

On calcul le débit nécessaire pour le refroidissement de la pièce la plus chaude pendant 8 heures de fonctionnement en été.

Cuisine en été :

Sachant que la température de soufflage est 18°C

Appliquons la relation (5.6) nous savons que $H_0 = 0,44 \text{ kW}$

Pour $\theta = 24^\circ\text{C}$ et $\varphi = 50\%$

L'annexe P indique :

$$h_2 = 47,340 \text{ kJ/k}_{gas}$$

$$r_2 = 9,2 \text{ kg/k}_{gas}$$

Pour les conditions de soufflage 18°C et $r_1 = r_2 = 9,2 \text{ kg/k}_{gas}$

L'annexe P donne :

$$h_1 = 41,232 \text{ kJ/k}_{gas}$$

$$v_1 = 462(0,622 + 0,0092) \frac{273+18}{101,325} = 0,837 \text{ m}^3/\text{k}_{gas}$$

Par conséquent :

$$q_{m_{as}} = \frac{0,44}{47,340 - 41,232} = 0,07 \text{ kg}_{as}/\text{s}$$

Le débit volumique de soufflage est alors

$$q_{v,1} = q_{m_{as}} \cdot v_1$$

$$q_{v,1} = 0,07 \times 0,847 = 0,05 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$q_{v,1} = 180 \text{ m}^3/\text{h}$$

Par la même méthode on calcul les débits nécessaires pour le refroidissement de chaque pièce

5.3.2 Calcul des dimensions des conduits de distribution de l'air

Les dimensions d'un conduit d'air se déterminent lorsqu'on connaît :

- Le débit volumique horaire du tronçon envisagé
- La vitesse admissible dans le tronçon

La vitesse dans un tronçon est la vitesse moyenne dans une section du tronçon. Cette vitesse moyenne est obtenue par la relation :

$$W = \frac{q_V}{A} \quad (5.8)$$

$$q_V = v \cdot q_{mas} \quad (5.9)$$

Pour clore cette partie, proposons-nous de calculer et de déterminer complètement l'installation de climatisation et de chauffage et de ventilation représentée à la figure 5.1.

Les caractéristiques de soufflage de chaque bouche sont données au tableau suivant :

Tableau 5.1 : caractéristiques de soufflage de chaque bouche

BOUCHE	Débit massique [kg/s]	Température de soufflage [°C]	Masse volumique de l'air [kg/m ³]	Débit volumique [m ³ /s]
Cuisine	0,0570	18	1,15	0,05
Chambre 1	0,0110	18	1,15	0,01
Chambre 2	0,0110	18	1,15	0,01
Chambre 3	0,0110	18	1,15	0,01
Chambre RDC	0,0110	18	1,15	0,01
Cage d'escalier	0,0340	18	1,15	0,03
Salle de bain 1 étage	0,0069	18	1,15	0,006
Salle de bain RDC	0,0069	18	1,15	0,006
salon	0,0230	18	1,15	0,02

On suppose que l'air soit soufflé à 18 °C et que les conduits sont bien calorifugés, on négligera par conséquent les pertes de chaleur des conduits.

Nous installerons des conduits cylindriques en tôle d'aluminium que nous considérerons comme très lisses.

Le coefficient de correction **a** permettant de tenir compte des conditions de températures (18°C) et de pression (101,300 Pa) est constant pour toute l'installation et égale à 1 (annexe Z). Par conséquent : $q_e = q_V$

5.3.3 Choix des vitesses de l'air

Il s'agit d'une installation centralisée de confort. L'annexe AA (1^{er} partie) recommande des vitesses comprises entre 3 et 5 [m/s] dans les conduits principaux et 1 et 3 [m/s] dans les conduits secondaires.

On adoptera une vitesse de soufflage de 3 [m/s] environ.

5.3.4 Choix de dimension de la conduite d'aspiration

En fonction du débit que j'ai trouvé et pour faciliter la tâche j'ai choisi un conduit constitué d'un seul tube posé en méandre de diamètre de 300 *mm* et de longueur de 40 *m* dont la perte de charge est de 0,25 Pa/*m*.

5.3.5 Choix du ventilateur

Prenons arbitrairement pour circuit principal celui qui aboutit à la bouche de soufflage N°8 (circuit le plus long).

Le calcul des pertes de charge de ce circuit est indiqué au tableau 5.2.

Le détail des pertes de charge singulières est donné au tableau 5.3.

La pression effective du ventilateur devra être de 46 Pa environ pour un débit de 0,152 *m*³/*s*, soit 547,2 *m*³/*h*.

A cette pression effective, il faudrait ajouter la pression dynamique dans le ventilateur (donnée par le constructeur) pour obtenir la charge ou pression totale du ventilateur.

Tableau 5.2: calcul des pertes de charge du circuit principale O-8

repère	q_m [kg/s]	ρ [kg/m ³]	q_v [m ³ /s]	W [m/s]	S [m ²]	D_e [mm]	$a = \frac{q_e}{q_v}$	q_e [m ³ /s]	J [Pa/m] Annexe R	L [m]	j.L [Pa]	$\frac{W^2}{2} \rho$ [Pa]	ξ	$\xi \frac{W^2}{2} \rho$ [Pa]	Pd_c [Pa]
OA	0,174	1,15	0,152	3	0,05	380	1	0,152	0,6	0,3	0,18	5,175	1,20	6,21	6,21
AB	0,174	1,15	0,152	3	0,05	380	1	0,152	0,6	3	1,8				1,8
BB ₁				3								5,175	0,3	1,55	1,55
B ₁ C	0,041	1,15	0,036	2	0,018	250	1	0,036	1,2	3	3,6				3,6
CC ₁				2								2,3	0,15	0,34	0,34
C ₁ D	0,041	1,15	0,036	2	0,018	250	1	0,036	1,2	3,5	4,2				4,2
DD ₁				1								0,575	0,5	0,287	0,28
D ₁ E	0,029	1,15	0,026	1	0,013	230	1	0,026	0,8	2	1,6				1,6
EE ₁				1								0,575	0,3	0,172	0,172
E ₁ F	0,03	1,15	0,02	0,25	0,08	200	1	0,02	0,45	3,15	1,4				1,4
FF ₂				0,25								0,035	0,15	0,005	0,005
F ₂ G	0,01	1,15	0,01	0,15	0,06	180	1	0,01	0,4	2	0,8				0,8
GG ₁				0,15								0,012	0,15	0,001	0,001
G ₁ 8	0,01	1,15	0,01	0,15	0,06	180	1	0,01	0,4	0,3	0,12				0,12
Bouche 8				0,15								0,012	1	0,012	0,012
Total															22

Tableau 5.3: calcul des coefficients de pertes de charge singulières du circuit principale O-8

repère	Type de singularité	caractéristique	Annexe correspondant	ξ
O	Orifice aspiration grillage	$\frac{R}{D} = 0,06$ $\frac{A_0}{A} = 0,8$	Annexe S Annexe T	0,20 1
BB_1	Dérivation (passage directe)	$\alpha = 90^\circ$ $A_1/A_3 = 0,46$ $q_{V2}/q_{V3} = 0,54$	Annexe U	0,3
CC_1	Coude arrondi	$\alpha = 90^\circ$ $\frac{R}{D} = 2$	Annexe V	0,15
DD_1	Dérivation (passage directe)	$\alpha = 90^\circ$ $A_1/A_3 = 0,68$ $q_{V2}/q_{V3} = 0,32$	Annexe U	0,5
EE_1	Dérivation (passage directe)	$\alpha = 90^\circ$ $A_1/A_3 = 1$ $q_{V2}/q_{V3} = 0,48$	Annexe U	0,3
FF_2	Dérivation (circuit dérivé) Section quelconque	$\alpha = 90^\circ$ $q_{V2}/q_{V3} = 0,55$	Annexe W	0,15
GG_1	Coude arrondi	$\alpha = 90^\circ$ $\frac{R}{D} = 2$	Annexe V	0,15
Bouche 8	Débouche libre		Annexe X	1

Tableau 5.4: calcul des coefficients de pertes de charge singulières des circuits dérivés

Repère	Type de singularité	caractéristique	Annexe correspondant	ξ
BB_2	Dérivation (circuit dérivé) Vitesse constante	$\alpha = 90^\circ$	Annexe U	1
HH_1	Dérivation (passage directe)	$\alpha = 90^\circ$ $A_1/A_3 = 0,62$ $q_{V2}/q_{V3} = 0,38$	Annexe U	0,4
JJ_1	Coude arrondi	$\alpha = 90^\circ$ $\frac{R}{D} = 2$	Annexe V	0,15
KK_1	Dérivation (passage direct) Sections quelconques	$\alpha = 90^\circ$ $A_1/A_3 = 1$ $q_{V2}/q_{V3} = 0,6$	Annexe W	0,15
LL_1	Dérivation (passage direct) Sections quelconques	$\alpha = 90^\circ$ $A_1/A_3 = 1$ $q_{V2}/q_{V3} = 0,6$	Annexe W	0,15
LL_2	Dérivation (circuit dérivé)	$q_{V2}/q_{V3} = 0,6$	Annexe U	0,1
Bouche 4 et 5	Débouche libre		Annexe X	1
HH_2	Dérivation (circuit dérivé)	$q_{V2}/q_{V3} = 0,38$	Annexe U	0,2
II_1	Dérivation (passage direct)	$\alpha = 90^\circ$ $A_1/A_3 = 1$ $q_{V2}/q_{V3} = 0,45$	Annexe W	0,3
II_2	Dérivation (circuit dérivé)	$q_{V2}/q_{V3} = 0,45$	Annexe U	0,15
DD_2	Dérivation (circuit dérivé)	$q_{V2}/q_{V3} = 0,32$	Annexe U	0,25
EE_2	Dérivation (circuit dérivé)	$q_{V2}/q_{V3} = 0,5$	Annexe U	0,15
FF_1	Dérivation (passage direct)	$A_1/A_3 = 1$ $q_{V2}/q_{V3} = 0,55$	Annexe W	0,3
GG_1	Coude arrondi	$\frac{R}{D} = 2$	Annexe V	0,15
KK_2	Dérivation (circuit dérivé)	$q_{V2}/q_{V3} = 0,4$	Annexe U	0,2
LL_2	Dérivation (circuit dérivé)	$q_{V2}/q_{V3} = 0,6$	Annexe U	0,1

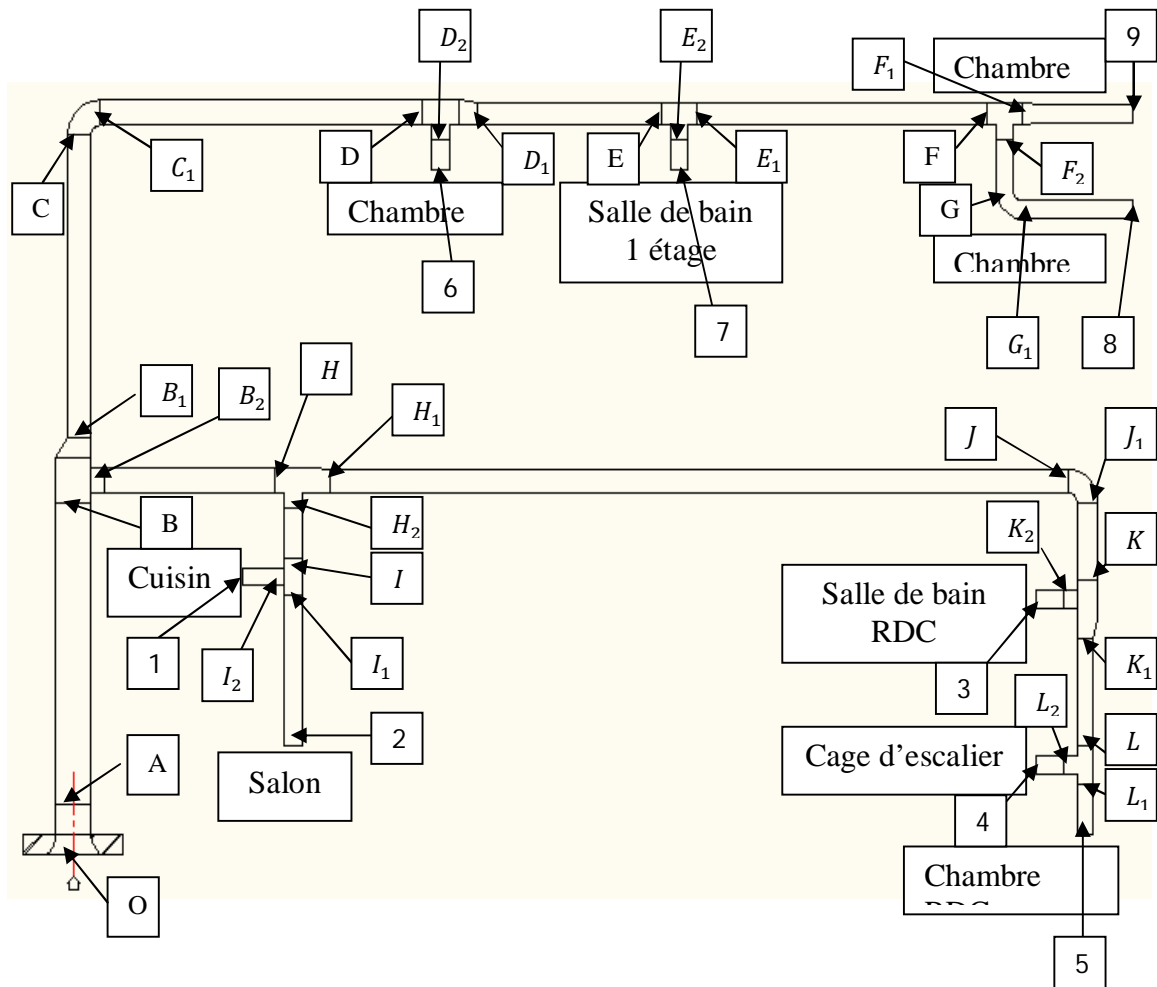


Figure 5.6: *circuit de distribution de l'air.*

Tableau 5.5: calcul des pertes de charge des différents circuits de l'installation

repère	q_m [kg/s]	ρ [kg/m ³]	q_v [m ³ /s]	W [m/s]	S [m ²]	D_e [mm] Annexe Y	$a = \frac{q_e}{q_v}$	q_e [m ³ /s]	J [Pa/m]	L [m]	j.L [Pa]	$\frac{W^2}{2} \rho$ [Pa]	ξ	$\xi \frac{W^2}{2} \rho$ [Pa]	Pd_c [Pa]
BB ₂				3								5,175	1	5,175	5,175
B ₂ H	0,133	1,15	0,116	3	0,038	250	1	0,116	1,3	3	3,9				3,9
HH ₁				3								5,175	0,4	2,07	2,07
H ₁ J	0,15	1,15	0,046	2	0,023	250	1	0,046	2,2	3,5	7,7				7,7
JJ ₁				2								3,2	0,15	0,345	0,345
J ₁ K	0,15	1,15	0,046	2	0,023	230	1	0,046	2,2	2	4,4				4,4
KK ₁				1								5,175	0,15	0,08	0,08
K ₁ L	0,13	1,15	0,04	0,5	0,02	230	1	0,04	0,7	2	1,4				1,4
LL ₁				0,5								0,143	0,15	0,02	0,02
L ₁ 5	0,11	1,15	0,01	0,15	0,06	180	1	0,01	0,14	0,3	0,04				0,04
LL ₂				0,5								0,143	0,1	0,014	0,23
L ₂ 4	0,11	1,15	0,03	0,5	0,06	180	1	0,03	0,3	0,3	0,09				0,09
Bouche 4				0,15								0,012	1	0,012	0,012
Bouche 5				0,15								0,012	1	0,012	0,012

Tableau 5.5: Suite

repère	q_m [kg/s]	ρ [kg/m ³]	q_v [m ³ /s]	W [m/s]	S [m ²]	D_e [mm]	$a = \frac{q_e}{q_v}$	q_e [m ³ /s]	J [Pa/m]	L [m]	j.L [Pa]	$\frac{W^2}{2} \rho$ [Pa]	ξ	$\xi \frac{W^2}{2} \rho$ [Pa]	Pd_c [Pa]
HH ₂				3								5,17	0,2	1,03	1,03
H ₂ I	0,080	1,15	0,07	1,16	0,06	250	1	0,19	0,65	1	0,65				0,65
II ₁				1								0,57	0,3	0,17	0,17
I ₁ 2	0,023	1,15	0,02	0,3	0,06	180	1	0,02	0,3	0,3	0,09				0,09
Bouche 2				0,15								0,005	1	0,005	0,005
I ₂ 1	0,057	1,15	0,05	0,5	0,1	180	1	0,05	0,16	0,3	0,04				0,04
II ₂				0,5								0,143	0,15		0,021
Bouche 1				0,25								0,035	1		0,035
DD ₂				1								0,575	0,25	0,143	0,143
D ₂ 6	0,11	1,15	0,01	0,15	0,06	180	1	0,1	0,5	0,3	0,15				0,15
Bouche 6				0,15								0,012	1	0,012	0,012
EE ₂				0,5								0,143	0,15		0,02
E ₂ 7	0,006	1,15	0,006	0,1	0,06	180	1	0,02	0,5	0,3	0,15				0,15
Bouche 7				0,1								0,005	1	0,005	0,005

Tableau 5.5: Suite

Pd_c [Pa]	0,043	0,042	0,012	0,028	0,15	0,005
$\xi \frac{W^2}{2} \rho$ [Pa]	0,043		0,012			0,005
ξ	0,3		1	0,028		1
$\frac{W^2}{2} \rho$ [Pa]	0,143		0,012	0,143		0,005
j.L [Pa]		0,042			0,15	
L[m]		0,3			0,3	
J[Pa/m]		0,14			0,5	
q_e [m ³ /s]		0,01			0,01	
$a = \frac{q_e}{q_v}$		1			1	
D_e [mm]		180			180	
S[m ²]		0,06			0,06	
W[m/s]	0,5	0,15	0,15	0,5	0,1	0,1
q_v [m ³ /s]		0,01			0,006	
ρ [kg/m ³]		1,15			1,15	
q_m [kg/s]		0,11			0,006	
repère	FF ₁	F ₁ 9	Bouche 9	KK ₂	K ₂ 3	Bouche 3

5.4 Dimensionnement du mur trombe

On a :

- ✓ Surface de mur égale à 10 % de la surface de la pièce.
- ✓ Epaisseur de mur égale à 20 cm.
- ✓ Surface des ouvertures égales à 3 % de la surface du mur trombe.

Tableau 5.6 : Dimensionnement de mur trombe pour chaque pièce.

pièce	Mur trombe		Ouverture		Vitrage		orientation
	hauteur	largeur	hauteur	largeur	hauteur	largeur	
Chambre 1	1,2	0,8	0,05	0,3	1,1	0,7	NE
Chambre 2	1,2	1	0,05	0,35	1,1	0,9	SE
Chambre 3	1,2	0,9	0,05	0,3	1,1	0,8	SO
Chambre RDC	0,8	1,2	0,05	0,3	0,7	1,1	SE
Salon	1,2	1,8	0,05	0,6	1,1	1,7	SO
Cuisine	0,8	1,2	0,05	0,3	0,7	1,1	SE
Cage d'escalier	1,2	1	0,05	0,35	1,1	0,9	SE

L'épaisseur des vitres est 1 cm

D'après l'équation (2.14) on trouve que : $U_v \approx 3,58 W/m^2K$ pour toutes les vitres.

Tableau 5.7 : les pertes du mur trombe pour chaque pièce quand la température extérieure est inférieure à la température de confort de la pièce.

Heure solaire	$\Delta\theta$	Chambre 1	Chambre 2	Chambre 3	Chambre RDC	$\Delta\theta$	Salon	Cuisine	Cage d'escalier	
20									-0,4	-10,207
22	-0,8	-15,878	-20,415	-18,146	-15,878	-2,8	-134,963	-55,573	-4,8	-122,488
0	-1,2	-23,817	-30,622	-27,219	-23,817	-3,2	-154,244	-63,512	-5,2	-132,695
2	-1,7	-33,741	-43,381	-38,561	-33,741	-3,7	-178,344	-73,436	-5,7	-145,454
4	-2,1	-41,680	-53,588	-47,634	-41,680	-4,1	-197,625	-81,375	-6,1	-155,661
6	-1,7	-16,870	-21,691	-19,280	-16,870	-3,7	-89,172	-36,718	-5,7	-72,727
7	-0,3	-2,977	-3,828	-3,402	-2,977	-2,3	-55,431	-22,825	-4,3	-54,864
8						-0,9	-21,691	-8,931	-2,9	-37,001
9						-0,2	-4,820	-1,985	-2,2	-28,070
									-1,5	-19,139
Qdt [kJ]		-134,963	-173,524	-154,244	-134,963		-836,289	-344,354		-778,306

5.5 Conclusion

Dans ce chapitre on a dimensionné les deux systèmes passifs on fonction des besoins de refroidissement.

On a trouvé que le puits canadien est très efficace par rapport au mur trombe puisque le mur trombe fonctionne que quand la température extérieure est inférieure à la température de confort en été.

Pour améliorer l'efficacité des diminué le coût de l'installation des ces deux systèmes il faut diminuer les déperditions dans la construction de bâtiment c'est-à-dire utilisé des isolant.

CONCLUSION GENERALE

Le réchauffement climatique de la terre a atteint des niveaux alarmants. Les pays investissent des sommes importantes dans le développement des nouvelles technologies et dans la construction de nouveaux types des maisons à basse consommation d'énergie qui utilise l'énergie gratuite dans la nature.

Matériellement et techniquement, construire des maisons confortables n'est pas une utopie. Les techniques et les matériels sont au point depuis longtemps et il existe de nombreuses réalisations dans différents pays européens.

Ce projet consiste d'assurer une température confortable dans une maison par l'installation des systèmes de refroidissement et de chauffage passifs est sans changement des matériaux de construction courants. Donc il existe quatre leviers pour améliorer le confort dans le bâtiment : l'utilisation des énergies renouvelables, la maîtrise des apports internes, l'inertie et la ventilation.

Avant l'installation des systèmes, nous avons fait une étude globale de la maison en tenant compte des paramètres géographiques, climatiques, géométrique et thermiques, puis on a calculé le bilan énergétique pour bien dimensionné les systèmes.

Dans la région d'Alger les systèmes passifs qu'on peut installer dans une maison sont le puits canadien et le mur trombe.

La grande force du puits canadien et du mur trombe réside dans leurs simplicité, propice à l'auto construction, mais il est indispensable de prendre en compte tous les paramètres qui influent sur les performances thermiques, énergétiques et économiques.

En terminant ce projet, nous avons appris pas mal d'informations dans les domaines de génie climatique, génie civil, architecture et sans oublier le génie mécanique qui en réalité englobe une partie de ces domaines. Ces informations enrichissent notre formation d'ingénieur en génie mécanique.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] G. Guarracino, Génie climatique dans le bâtiment : Thermique du bâtiment, Technique de l'ingénieur, BE 9 010.
- [2] Rev : Biocontact « Construire écologique » – N°157. – p.26 à 90.
- [3] R. Belarbi, M. SpCrandio, F. Allard, Evaluation des bâtiments munis de systèmes de rafraîchissement passif. Application au cas de l'évaporation adiabatique, Rev. Gén. Therm (1997), 36, 547-561.
- [4] P. DEPECKER, C. INARD, Lois fondamentales en génie climatique, Technique de l'ingénieur, B 9 055.
- [5] R. ANGIOLETTI, H. DESPRETZ, Maîtrise de l'énergie dans les bâtiments : Techniques, Technique de l'ingénieur, BE 9 021.
- [6] C. A. Roulet, A. Dauriat, énergétique du bâtiment, EPFL, 2008.
- [7] G.Porcher, Cours de climatisation bases de calcul des installations de climatisation, Les Editions parisiennes, 1993.
- [8] Données climatologiques, Office national de la métrologie, Station d'Alger, Avril 2010.
- [9] www.ademe.fr
- [10] R. Jobert, Le puits canadien ou puits provençal, CETE, 2005.
- [11] H. Reznagel, E. Sprenger, E. R. Schramek, Le Reznagel : Manuel pratique du génie climatique, 3ième édition, PIC EDITION, Paris, 2001.

ANNEXES

Annexe A : Vue en plan du Rez-de-chaussée.

Annexe B : Vue en plan de 1^{ère} étage.

Annexe C : Coefficients de conduction thermique utile λ des matériaux de construction les plus courants [11].

Annexe D : Coefficient de conductivité thermique λ de divers revêtements de sol [11].

Annexe E : Températures intérieures de base [7].

Annexe F : Apports effectifs d'un vitrage ordinaire et non protégé [7].

Annexe G : Coefficient de correction a appliqué aux apports effectifs pour tenir compte de l'altitude [7].

Annexe H : Coefficient de correction N affectant les apports effectifs d'un vitrage [7].

Annexe I : Facteur d'absorption de quelques matériaux de construction [7].

Annexe J : Flux solaire global [8]

Annexe K : valeur du coefficient M (apports dus à l'éclairage) [7].

Annexe L : Valeurs de la hauteur h du soleil au dessus de l'horizon en fonction de la latitude et de l'heure solaire [7].

Annexe M : Valeurs de l'azimut \hat{a} du soleil par rapport à la normale à la façade ensoleillée [7].

Annexe N : Apports dus aux occupants [7].

Annexe O : valeurs moyenne des apports calorifiques dus aux machines [6].

Annexe P : valeurs de r en fonction de la température et du degré hygrométrique [7].

Annexe Q : Abaque de calcul des ombres latérales dues aux retraits ou aux saillies de la construction [7].

Annexe R : Pertes de charge réparties des conduits très lisse [7].

Annexe S : Coefficients de pertes de charge singulières des orifices d'aspiration encastrés [7].

Annexe T : Coefficient de pertes de charges singulières des grillages, tôles, perforées, registres, clapets [7].

Annexe U : Coefficient de pertes de charges des dérivations de conduits à section cylindrique ou rectangulaire (vitesse constante : $A_3 = A_2 + A_1$) [7].

Annexe V : Coefficient de pertes de charges singulières des coudes arrondis simples [7].

Annexe W : Coefficient de pertes de charges des dérivations de conduits à section cylindrique ou rectangulaire (sections quelconques) [7].

Annexe X : Coefficient de pertes de charges singulières des droits cloisonnés [7].

Annexes Y : Calcul du diamètre équivalent d'un conduit rectangulaire ou carré [7].

Annexe Z : Valeurs de **a** dans le cas de conduits très lisses [7].

Annexe AA : Vitesse moyennes optimales recommandées dans les différents circuits d'une installation de climatisation [7].

