

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université Hassiba Benbouali de Chlef

Faculté Technologie.....

Département Mécanique.....



THÈSE

Présentée pour l'obtention du diplôme de

DOCTORAT

Filière : Mécanique.....

Spécialité : Génie Mécanique.....

Par

NEFISSA BELKACEM

Thème :

Contribution à l'évaluation des performances énergétiques et environnementales d'un habitat individuel bioclimatique : cas de la maison pilote de Soudania –Alger- (Algérie)

Soutenue le 04/04/2017, devant le jury composé de :

| | | | |
|----------------------|------------------------|---|--------------------|
| Hamou ZAHLOUL | Professeur | UHB Chlef | Président |
| Abderrahmane HAMIDAT | Directeur de recherche | CDER | Examinateur |
| Amar HADJ-ARAB | Directeur de recherche | CDER | Examinateur |
| Miloud TAHAR-ABBES | Professeur | UHB Chlef | Examinateur |
| Ahmed BETTAHAR | Professeur | UHB Chlef | Examinateur |
| Larbi LOUKARFI | Professeur | UHB Chlef | Directeur de thèse |
| Hassane NAJI | Professeur | Université d'Artois et Université Lille Nord de France | Invité |

Remerciements

Ce travail de thèse n'aurait pas été possible sans l'appui et le soutien de nombreuses personnes que je souhaite ici vivement remercier :

- Monsieur **LOUKARFI Larbi**, Professeur des universités qui m'a proposé ce passionnant sujet de recherche, pour ses précieux conseils et ses réflexions pertinentes, de m'avoir dirigé tout au long de ce travail avec patience, pédagogie, ainsi que pour sa disponibilité à toute épreuve. En plus de ses qualités scientifiques, j'ai eu l'occasion d'apprécier ses qualités humaines. Qu'il trouve ici l'expression de ma profonde gratitude.

- Monsieur **NAJI Hassane**, Professeur des universités, à qui j'exprime particulièrement toute ma reconnaissance pour l'accueil qu'il m'a réservé au sein du laboratoire Génie Civil et géoEnvironnement (LGCgE), de m'avoir fait bénéficier de ses compétences scientifiques, son aide et sa disponibilité. Mes vifs remerciements, ma sincère considération.

- Monsieur **MISSOUM Mohammed**, Docteur d'état, pour ses encouragements, son suivi et pour m'avoir accompagné et guidé tout au long de ce travail.

- Monsieur **ZAHLOUL Hamou**, Professeur des universités, qui m'a fait l'honneur d'accepter la présidence de jury d'évaluation, et de m'avoir accueilli au sein du laboratoire de recherche qu'il dirige.

- Messieurs **BETTAHAR Ahmed**, **TAHAR-ABBES Miloud**, professeurs à l'Université Hassiba Benbouali de Chlef, et messieurs **HADJ-ARAB Amar** et **HAMIDAT Abderrahmane**, Directeurs de recherche au Centre de Développement des Energies Renouvelables, d'avoir accepté de faire partie du jury d'évaluation en qualité d'examineurs.

- Le staff du département de mécanique, de la faculté de Technologie, ainsi que celui du vice-rectorat de la post-graduation et de la recherche, sans oublier le personnel du Centre de Développement des Energies Renouvelables (C.D.E.R) de Bouzereah à Alger qui m'a accueilli au Centre et m'a fourni les données dont j'avais besoin.

- Monsieur **MOUDJEBER Djamel-Eddine**, Maitre de conférence , pour son intérêt permanent à mon égard et à mon travail, ainsi que son soutien sur le plan humain

- Tous les enseignants qui ont contribué à ma formation scientifique au sein du département de mécanique, sans oublier ceux qui ont contribué à forger mes connaissances depuis le préparatoire.

- Mes profonds remerciements vont à ma famille pour leur soutien et leur aide. Ma gratitude et mon admiration à ma mère, qui m'a toujours permis de mener à bien tous mes projets.

Mes sincères remerciements à vous tous

Résumé

En Algérie, le secteur résidentiel tertiaire est le plus gros consommateur d'énergie, avec 41% de l'énergie finale totale et 31% des émissions de GES. Il s'avère donc que ce secteur représente non seulement un gisement important d'économie d'énergie, mais également une occasion de protéger l'environnement en réduisant les impacts des émissions de gaz à effet de serre.

Cette thèse est considérée comme une contribution à l'évaluation des performances énergétiques et environnementales d'une maison bioclimatique. L'objectif est non seulement d'évaluer mais aussi d'explorer les moyens d'améliorer les performances énergétiques de ce type d'habitation. La méthodologie consiste en premier lieu à mener pendant la période hivernale une série de mesures expérimentales, pour montrer l'effet des gains solaires passifs et actifs sur la température de l'air intérieur de la maison. Ensuite, un modèle dynamique d'un système de chauffage solaire couplé avec la maison a été développé en utilisant le logiciel TRNSYS et validé avec les données expérimentales. Le modèle validé a été utilisé pour établir le bilan énergétique de la maison bioclimatique pilote sans système de chauffage solaire et de le comparer à celui d'une maison conventionnelle en Algérie. En outre, une étude environnementale a permis de calculer les émissions de CO₂, sur la base de la consommation annuelle d'électricité et de gaz naturel de la maison.

Cette recherche permettra aux concepteurs d'améliorer l'efficacité énergétique des bâtiments dans un climat de type méditerranéen et de réduire les émissions de gaz à effet de serre par une conjonction de différentes techniques de chauffage et rafraîchissement passifs tels que l'isolation, la masse thermique, les dispositifs d'ombrage, ventilation nocturne et système de chauffage solaire. Elle fournira aux concepteurs une stratégie efficace en termes d'économies d'énergie et de confort thermique intérieur.

ملخص

يُعتبر القطاع السكني في الجزائر، يعد أكبر مستهلك للطاقة بـ40% من إجمالي الطاقة النهائية و 30% من انبعاث الغازات الدفيئة. ولذلك يتبين أن هذا القطاع، ليس فقط مصدراً هاماً من مصادر توفير الطاقة، ولكن أيضاً فرصة لحماية البيئة عن طريق الحد من تأثير انبعاث الغازات المسببة للاحتباس الحراري.

تُساهم هذه الأطروحة في تقدير الأداء الطاقوي و البيئي لمنزل مناخياًحيائي نموذجي ثلاثي الغرف، تمّ تصميمه وأعدّ إنشائه في مقاطعة السويدانية بالجزائر العاصمة، وكذا في دراسة إمكانية تحسين هذا الأداء، بوسائل فعّالة و غير فعّالة، دون التأثير السلبي على البيئة. فأعتمدت لذلك، منهجية تمثلت بالأساس في جملة من التجارب على المنزل محور البحث، بُغية استخدامها في عملية النمذجة.

فتمّ القيام بسلسلة من القياسات التجريبية خلال الفترة الشتوية، بغرض إظهار تأثير مكاسب الطاقة الشمسية على أسباب الراحة، ومدى إنعاشها وفقاً لدرجة حرارة مُلائمة داخل المنزل النموذجي المدقّق بالطاقة الشمسية.

بعد ذلك تمّ تطوير نموذج تنبؤي على أساس برنامج TRNSYS، تمّ التأكد من تطابقه مع التجربة، فأستُخدم في تقدير المُتطلبات الطاقوية لهذا المنزل، وذلك بدون الاعتماد على المنضومة الشمسية المُوجهة للتدفئة، لمُقارنتها بمستهلكات منزل تقليدي (جزائري).

فأثبتت الدراسة في النهاية، أن المنزل النموذجي المُقترح تصميمه و تجهيزه بالأنظمة المذكورة فيما سبق، جيّد الأداء الطاقوي والبيئي، وبالتالي يُمكن تعميمه في الوطن.

إنها سوف تسمح لمُصممي المباني المُتمتعة بمناخ البحر الأبيض المتوسط بأستغلال المبادئ الأساسية للسكن المناخياًحيائي بهدف توفير الطاقة و تحسين الفعالية الطاقوية و توفير أسباب الرّاحة للشاغرین، دون الإضرار بالبيئة. ويُمكن استخدام مُختلف تقنيات التدفئة و التكييف الشمسيين مع الاعتماد على العزل الحراري و الإستمرارية الحرارية (أهليّة المبنى لاسترداد الحرارة المخزّنة) و التهوية الليلية و التركيز على أجهزة التضاؤل.

Abstract

In Algeria, the tertiary residential sector is the largest consumer of energy, with 41 % of total final energy and 31 % of GHG emissions. It therefore appears that this sector represents not only an important source of energy savings, but also an opportunity to protect the environment by reducing the impact of greenhouse gas emissions.

This thesis is considered as a contribution to the evaluation of energy and environmental performance of a bioclimatic house. The aim is not only to assess but also to improve the energy and environmental performance of this pilot bioclimatic house located in Souidania-Algiers (Algeria). The methodology is to first conduct during winter a series of experimental measurements, to show the effect of passive solar gains and assets on increasing the temperature of the air inside the house. Then, a dynamic model of a solar heating system coupled with the house was developed using the TRNSYS software and validated with experimental data. The validated model was used to measure the energy of the pilot bioclimatic house without solar system and compare them to those of a conventional house in Algeria. Finally, improving the energy balance of the pilot bioclimatic house was made by passive and active means. Furthermore, an environmental study allowed to calculate the CO₂ emissions, was established on the basis of the annual consumption of electricity and natural gas in the house.

This work will enable engineers and designers of buildings in Mediterranean climate to improve building energy efficiency, and reduce CO₂ emissions by a conjunction of different passive heating and cooling techniques such as insulation, thermal mass, window shades, night ventilation and the solar heating system. The paper provides designers an effective strategy in terms of energy savings and indoor thermal comfort while reducing CO₂ emissions.

Table des matières

| | |
|---|----------|
| Remerciements..... | I |
| Résumé..... | III |
| ملخص..... | IV |
| Abstract..... | V |
| Table des matières..... | VI |
| Nomenclature..... | XI |
| Introduction générale..... | 1 |
| Chapitre I: Habitat bioclimatique | |
| I.1 Introduction | 7 |
| I.2 Habitat bioclimatique | 8 |
| I.3 Architecture bioclimatique..... | 9 |
| I.3.1 Stratégies de l'architecture bioclimatique. | 11 |
| I.3.2 Principe et bases de l'architecture bioclimatique..... | 12 |
| I.3.2.1 Les bases de conception d'ensemble..... | 13 |
| I.3.2.2 Les bases de conception de détails..... | 20 |
| I.4 Conclusion..... | 34 |
| Chapitre II: Modélisation | |
| II.1 Introduction..... | 46 |
| II.2 Outils de simulation..... | 46 |
| II.2.1 Les outils d'analyse de cycle de vie..... | 46 |
| II.2.2 Les outils de simulation énergétique..... | 47 |
| II.2.2.1 Les outils de simulation simplifiés..... | 47 |
| II.2.2.2 Les outils de simulation dynamique..... | 48 |
| II.3 Présentation du logiciel TRNSYS | 48 |
| II.3.1 Description du modèle de simulation avec le logiciel TRNSYS..... | 49 |
| II.3.1.1 Modèle de la maison..... | 50 |
| II.3.1.2 Modèle du capteur thermique..... | 52 |
| II.3.1.3 Modèle du réservoir de stockage..... | 53 |
| II.4 Conclusion..... | 55 |

Chapitre III: Evaluation des performances énergétiques et environnementales d'une habitation bioclimatique dans le nord de l'Algérie

| | |
|--|------------|
| III.1 Introduction..... | 62 |
| III.2 Utilisation de l'énergie solaire dans le chauffage de l'habitat..... | 64 |
| III.2.1 Principes du chauffage solaire de l'habitat..... | 65 |
| III.2.1.1 Le solaire thermique actif..... | 66 |
| III.2.1.2 Le solaire thermique passif..... | 67 |
| III.2.2 Le plancher solaire direct..... | 68 |
| III.3 Description de la maison et de ses systèmes de services | 69 |
| III.3.1 Caractéristiques de la maison étudiée..... | 69 |
| III.3.2 Description du système de chauffage solaire | 72 |
| III.4 Analyse des données météorologiques..... | 75 |
| III.5 Approche expérimentale de l'étude..... | 78 |
| III.5.1 Acquisition de données..... | 78 |
| III.5.2 Résultats de l'étude expérimentale..... | 80 |
| III.5.2.1 Effet des stratégies bioclimatiques..... | 80 |
| III.5.2.2 Efficacité du système de chauffage solaire | 84 |
| III.6 Résultats de la simulation..... | 87 |
| III.6.1 Validation du modèle..... | 87 |
| III.6.2 Analyse du bilan énergétique..... | 89 |
| III.6.3 Amélioration du confort thermique..... | 91 |
| III.6.3.1 Effet de la taille de la fenêtre..... | 92 |
| III.6.3.2 Effet de la ventilation nocturne et des dispositifs d'ombrage..... | 93 |
| III.6.3.3 Contribution du système de chauffage solaire..... | 96 |
| III.7 Impact environnemental..... | 97 |
| III.8 Conclusion..... | 100 |
| Conclusion générale..... | 109 |
| Glossaire..... | 112 |

Liste des figures

Introduction générale

| | |
|--|---|
| Figure 1 Structure de la consommation d'énergie finale par produit en Algérie pour l'année 2014 | 2 |
| Figure 2 Consommation énergétique finale par secteur en Algérie pour l'année 2014 | 2 |
| Figure 3 Répartition de la consommation du secteur résidentiel par types d'énergie pour l'année 2014 | 3 |
| Figure 4 Structure sectorielle des émissions de GES dues à la consommation énergétique | 4 |

Chapitre I: Habitat bioclimatique

| | |
|--|----|
| Figure I.1 Maison bioclimatique conçu en 2015 à Auray (France)..... | 8 |
| Figure I.2 L'équilibre entre les trois pivots de l'architecture bioclimatique..... | 10 |
| Figure I.3 Stratégies de l'architecture bioclimatique..... | 11 |
| Figure I.4 Principes d'implantation d'un édifice..... | 13 |
| Figure I.5 Impact de la forme, la taille et la proximité d'autres volumes sur la compacité de formes simples..... | 15 |
| Figure I.6 Variation des besoins annuels de chauffage d'une habitation en fonction de l'orientation et de la proportion de surface vitrée..... | 18 |
| Figure I.7 Répartition des différentes pièces de la maison | 19 |
| Figure I.8 Protections solaires extérieures mobiles..... | 22 |
| Figure I.9 Protections solaires extérieures fixes..... | 23 |
| Figure I.10 Protections solaires par la végétation..... | 23 |
| Figure I.11 Fonctionnement d'une serre en hiver et en été..... | 24 |
| Figure I.12 Façade double peau..... | 25 |
| Figure I.13 Principe de fonctionnement de l'isolation transparente..... | 33 |

Chapitre II: Modélisation

| | |
|--|----|
| Figure II.1 Processus de simulation par TRNSYS..... | 50 |
| Figure II.2 Entrées et sorties du modèle de la maison..... | 51 |
| Figure II.3 Entrées et sorties du capteur thermique..... | 52 |

| | |
|--|----|
| Figure II.4 Entrées et sorties du ballon de stockage..... | 53 |
| Figure II.5 Aperçu d'une maison avec système de chauffage solaire dans le studio TRNSYS..... | 55 |

Chapitre III: Evaluation des performances énergétiques et environnementales d'une habitation bioclimatique dans le nord de l'Algérie

| | |
|---|----|
| Figure III.1 La maison pilote bioclimatique..... | 69 |
| Figure III.2 Vue en plan de la maison pilote bioclimatique..... | 71 |
| Figure III.3 Croquis du système de chauffage solaire..... | 74 |
| Figure III.4 Evolution horaire de la température ambiante..... | 75 |
| Figure III.5 Evolution mensuelle de l'irradiation horizontale globale à Alger.... | 77 |
| Figure III.6 Croquis du système d'acquisition..... | 79 |
| Figure III.7 Variation de la température extérieure et du rayonnement solaire au cours de la période considérée..... | 81 |
| Figure III.8 Variation de la température surfacique du mur pendant la période considérée..... | 82 |
| Figure III.9 Variations de la température intérieure dans la maison pilote pendant le période considérée..... | 83 |
| Figure III.10 Effet du plancher chauffant sur la température de l'air intérieur au cours de la période de considérée..... | 85 |
| Figure III.11 Température moyenne du réservoir pendant la période de considérée..... | 86 |
| Figure III.12 Les températures mesurées et simulées de l'air intérieur des deux chambres de la maison pilote..... | 88 |
| Figure III.13 Besoins énergétiques mensuels de la maison bioclimatique et conventionnelle..... | 89 |
| Figure III.14 Besoins énergétiques annuels de la maison conventionnelle et maison bioclimatique..... | 91 |
| Figure III.15 Effet de la taille de la fenêtre sur la demande d'énergie pour le chauffage..... | 92 |
| Figure III.16 Fréquence horaire pour les zones de confort thermique à l'intérieur de la maison en été..... | 94 |

Figure III.17 Demande d'énergie pour le chauffage de la maison avec et sans utilisation de PSD.....96

Figure III.18 Bilan environnemental de la maison bioclimatique et maison conventionnelle.....98

Liste des tableaux

Chapitre III: Evaluation des performances énergétiques et environnementales d'une habitation bioclimatique dans le nord de l'Algérie

Tableau III.1. propriétés des matériaux de construction pour la maison pilote et maison conventionnelle en Algérie.....71

Tableau III.2 Caractéristiques du capteur solaire thermique.....74

Tableau III.3 Caractéristiques réservoir de stockage.....75

Tableau III.4 Caractéristiques du système de plancher chauffant.....77

Tableau III.5 Moyenne mensuelle, maximum et minimum des températures à Alger.....77

Tableau III.6 Moyenne mensuelle, maximum et minimum des radiations solaires horizontales globales à Alger.....78

Tableau III.7 Equipements utilisés pour l'acquisition de données.....80

Tableau III.8 Déviation et valeurs des températures.....88

Tableau III.9 Fréquence horaire pour les zones de confort thermique à l'intérieur de la maison bioclimatique avec et sans ventilation nocturne.....95

Tableau III.10 Comparaison entre les émissions spécifiques de la maison conventionnelle et la maison bioclimatique avec et sans système de chauffage solaire.....99

Nomenclature

| Notation | Unité | Désignation |
|-----------------------------|----------------------------------|---|
| C_f | m^2/m^3 | Coefficient de forme |
| S | m^2 | Surface de l'enveloppe |
| V_h | m^3 | Volume habitable |
| R | $m^2 \cdot ^\circ C/W$ | Résistance thermique d'une paroi |
| U | $KJ/hr \cdot m^2 \cdot ^\circ C$ | Coefficient de transmission thermique |
| e | M | Epaisseur de la paroi |
| λ | $W/m \cdot ^\circ C$ | Conductivité thermique du matériau |
| \dot{Q}_T | KJ/hr | Bilan énergétique global |
| \dot{Q}_{surf} | KJ/hr | Flux thermique convectif de toute surface intérieure |
| h_c | $KJ / kg K$ | Coefficient de transfert de chaleur par convection |
| ρ_a | kg/m^3 | Masse volumique de l'air |
| c_a | $KJ/kg K$ | Chaleur spécifique de l'air |
| $T_{s,i}$ | $^\circ C$ | Température de la surface intérieure |
| T_i | $^\circ C$ | Température intérieure |
| \dot{Q}_{inf} | KJ/hr | Gain par infiltration du flux d'air extérieur |
| \dot{m}_{inf} | Kg/s | Débit massique d'air infiltré |
| T_o | $^\circ C$ | Température extérieure |
| \dot{Q}_{vent} | KJ/hr | Gains par ventilation du système CVC |
| \dot{Q}_{gain} | KJ/hr | Apports internes par convection (éclairage, occupants, appareils électroménagers) |
| \dot{Q}_{cplg} | KJ/hr | Gains dus au flux d'air convectif d'une zone ou d'une condition aux limites |
| $\dot{m}_{j \rightarrow i}$ | Kg/s | Débit massique d'air de la zone j vers la zone i |
| $T_{zone,i}$ | $^\circ C$ | Température de l'air intérieur de la zone |
| Q | m^3/s | Débit volumique |
| ΔP | Pa | Chute de pression |
| U_e | $KJ/hr \cdot m^2 \cdot K$ | Coefficient de déperditions thermiques à partir des bordures du collecteur |
| U_b | $KJ/hr \cdot m^2 \cdot K$ | Coefficient de déperditions thermiques en bas du capteur |
| τ | | Transmission du couvercle du capteur |

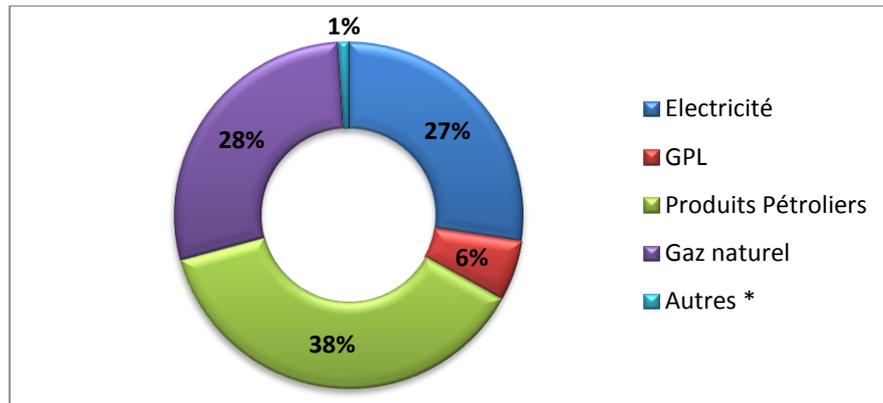
| | | |
|------------------|-------------------------|--|
| α | | Absorption de l'absorbeur du capteur |
| N_g | | Nombre de couvercles en verre du capteur |
| KL | | Produit du coefficient d'extinction et l'épaisseur du couvercle en verre |
| n | | Fraction de l'angles d'incidence et de réfraction des rayons solaires |
| Q_u | KJ/hr | Gain d'énergie utile |
| A_c | m ² | Surface du capteur |
| N_s | | Nombre de modules en série |
| $F_{R,j}$ | | Facteur de dissipation de chaleur du module j |
| I_T | KJ/hr.m ² | Irradiation globale incidente sur le capteur solaire (surface inclinée) |
| $\tau\alpha$ | | Produit de la transmission de couverture et l'absorption de l'absorbeur. |
| $U_{L,j}$ | KJ/hr.m ² .K | Coefficient de déperditions thermiques totales du module j |
| $T_{i,j}$ | °C | Température d'entrée du fluide dans le module j |
| T_a | °C | Température ambiante |
| \dot{m}_f | Kg/hr | Débit massique du fluide |
| C_{pf} | KJ/Kg.K | Chaleur spécifique du fluide |
| $N_{L,j}$ | | Nombre total des modules du capteur |
| f | | Facteur de rendement d'ailettes du capteur |
| V_{tank} | m ³ | Volume du ballon de stockage |
| H_{tank} | m | Hauteur du ballon de stockage |
| C_p | KJ/Kg.K | Chaleur spécifique du fluide du ballon de stockage |
| U_{tank} | KJ/hr.m ² .K | Coefficient de déperditions thermique du ballon de stockage |
| A_{HX} | m ² | Surface totale de l'échangeur de chaleur |
| T_{env} | °C | Température ambiante |
| L | m | Longueur de l'échangeur de chaleur |
| λ_{wall} | KJ/hr.m.K | Conductivité thermique de l'échangeur de chaleur |
| K_{wall} | KJ/hr.m ² .K | Coefficient de transmission thermique de l'échangeur de chaleur |
| d_i | m | Diamètre intérieur de l'échangeur de chaleur |
| d_o | m | Diamètre extérieur de l'échangeur de chaleur |

| | | |
|------------------|-------------------------|--|
| \dot{Q}_{acum} | KJ/Kg.hr | Energie accumulée dans le ballon de stockage |
| T_{tank} | °C | Température moyenne du ballon de stockage |
| \dot{Q}_{hx} | KJ/Kg.hr | Energie fournie par l'échangeur de chaleur |
| UA_{HX} | KJ/hr.m ² .K | Coefficient de déperditions thermiques de l'échangeur de chaleur |
| $LMDT$ | °C | Température moyenne logarithmique |
| \dot{Q}_{load} | KJ/Kg.hr | Energie extraite pour la charge |
| \dot{m}_{DHW} | kg/hr | Débit massique de l'ECS |
| $T_{DHW,in}$ | °C | Température à l'entrée de l'ECS |
| $T_{DHW,out}$ | °C | Température à la sortie de l'ECS |
| $T_{SH,in}$ | °C | Température à l'entrée du chauffage de la maison |
| $T_{SH,out}$ | °C | Température à la sortie du chauffage de la maison |
| \dot{Q}_{loss} | KJ/Kg.hr | Pertes d'énergie |
| ΔU | KJ/hr.m ² .K | Coefficient de perte supplémentaire pour le réservoir |
| A_{tank} | m ² | Surface du réservoir |
| T_{tank} | °C | Température moyenne du réservoir |
| \dot{m}_{SH} | kg/hr | Débit massique du chauffage de la maison |

Introduction générale

Le monde entier est confronté à une augmentation de la consommation énergétique d'une façon accrue depuis déjà plusieurs décennies. Cette augmentation met en péril le mode de gestion des ressources aussi bien pour les pays importateurs qui, du fait de la raréfaction des réserves d'énergie, se trouvent confrontés à la précarité de leur approvisionnement en énergie et au prix juste de l'énergie, que les pays exportateurs qui ont besoin de liquidités pour se développer et voient une part importante de leurs ressources financières consacrées à assurer, à coût de subventions, une grande consommation énergétique domestique (BOURSAS 2013). Cette énergie reste dans l'écrasante majorité, d'origine fossile donc non renouvelable à court et moyen terme et qui est la première source des émissions de gaz à effet de serre (GES¹) dans un monde qui souffre déjà des effets de l'activité humaine sur son environnement, ces émissions sont considérées comme la cause principale du réchauffement climatique (GIEC 2014). L'Algérie doit faire face aux conséquences de l'utilisation insouciante de ces énergies conventionnelles, et à leur pénurie prévisible. Sur la figure 1 suivante on remarque une structure de la consommation d'énergie finale par produit en Algérie qui est basée essentiellement sur l'utilisation des produits pétroliers.

¹ GES: Les Gaz à Effet de Serre sont des composants gazeux qui contribuent par leurs propriétés physiques à l'effet de serre en empêchant le rayonnement solaire de s'échapper de l'atmosphère (ex: CO₂, méthane...). L'augmentation de leur concentration dans l'atmosphère terrestre est un des principaux facteurs à l'origine du réchauffement climatique.



*Autres: bois et coke sidérurgique²

Figure 1 Structure de la consommation d'énergie finale par produit en Algérie pour l'année 2014 (MEA 2015)

Afin d'analyser l'évolution de la consommation énergétique finale par secteur, on présente la figure 2 suivante:

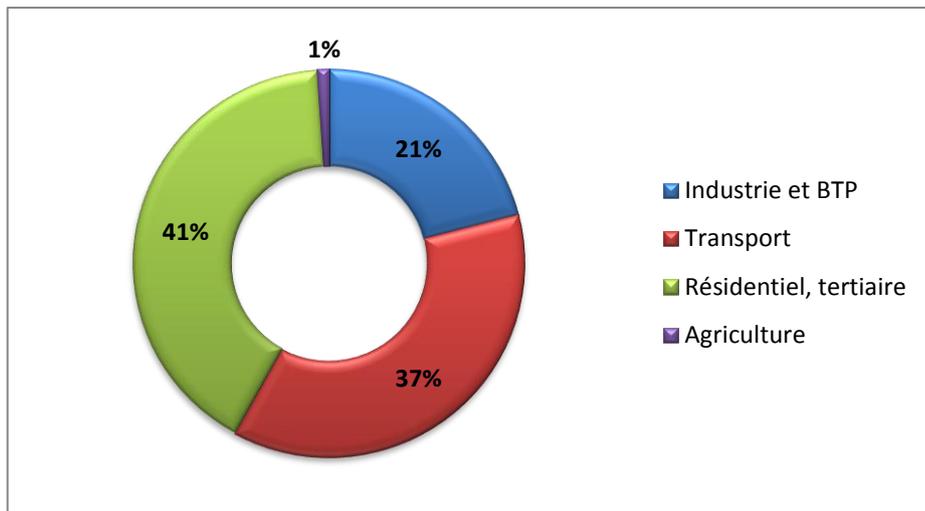


Figure 2 Consommation énergétique finale par secteur en Algérie pour l'année 2014 (MEA 2015)

L'analyse de l'utilisation finale de l'énergie par secteur d'activité met en lumière la prépondérance du secteur "résidentiel tertiaire" qui représente 41 % de la consommation totale d'énergie. Ce secteur a connu une hausse de (+ 3,8 %) par rapport à sa consommation pendant l'année 2013. En effet, le parc de logements actuel en Algérie est estimé à 6,5 millions d'unités, dont 56,1 % de maisons individuelles et 43,9 % de logements collectifs. En 2014, le sous-secteur résidentiel prend à lui seul une part de 37 % de la consommation énergétique

² Coke sidérurgique: c'est le charbon qui a été transformé en coke pour pouvoir l'utiliser dans l'industrie sidérurgique (production de la fonte, du fer et de l'acier).

finale totale. Ceci est dû à l'accroissement du parc immobilier, et la diffusion de nouveaux besoins à forte consommation tels que la micro-informatique ou la climatisation (APRUE³ 2014; MEA 2015).

D'après les statistiques, la figure 3 représente les principaux types d'énergie utilisée dans le secteur résidentiel.

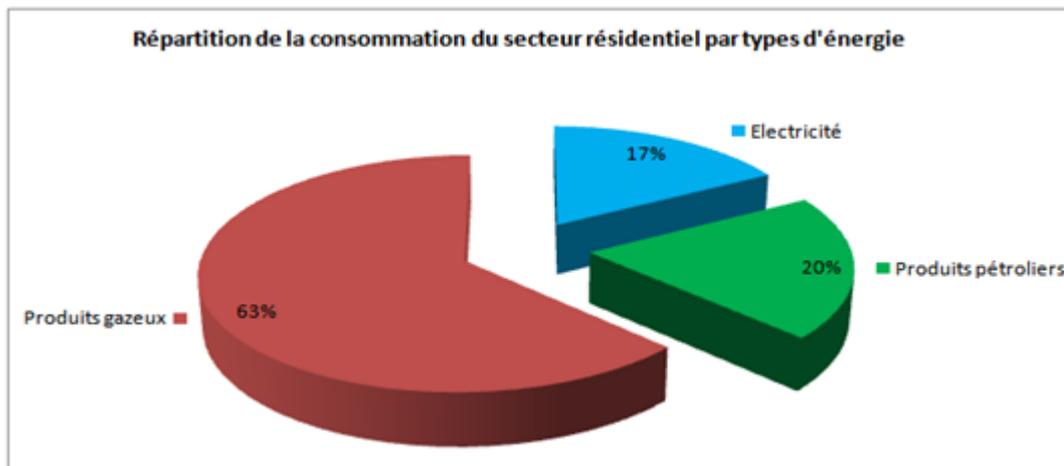


Figure 3 Répartition de la consommation du secteur résidentiel par types d'énergie pour l'année 2014 (APRUE 2014)

L'analyse des données fait ressortir la prépondérance de des produits gazeux avec 63 %, suivis des produits pétroliers avec 20 %, et, en dernier lieu vient l'électricité qui atteint 17 % de la consommation énergétique totale. Loin de s'équilibrer, le bilan énergétique dans le secteur résidentiel en Algérie est devenu dépendant complètement des produits gazeux. Cette dépendance est le signe de sa fragilité et de sa vulnérabilité aux fluctuations des prix de l'énergie.

L'analyse de la tendance générale de la consommation énergétique du secteur résidentiel en Algérie montre que cette énergie reste dans l'écrasante majorité, d'origine fossile, d'autre part les émissions de gaz à effet de serre (GES) sont essentiellement liées à cette consommation, c'est pour cela que ce secteur occupe le second poste le plus émetteur des rejets nationaux (figure 4):

³ APRUE: Agence nationale pour la Promotion et la Rationalisation de l'Utilisation de l'Energie

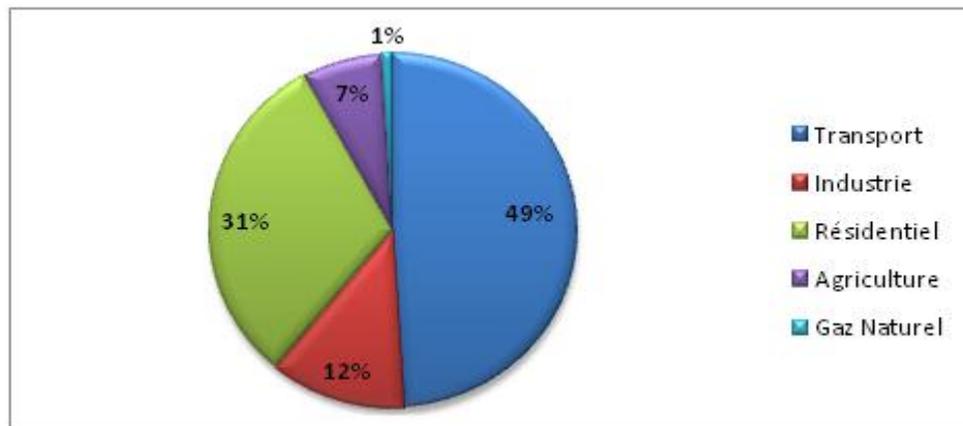


Figure 4 Structure sectorielle des émissions de GES dues à la consommation énergétique (APRUE 2014)

En effet, à hauteur de 31 %, le secteur résidentiel représente une source importante des émissions de GES; utilisation du gaz naturel par les ménages étant à l'origine d'une grande partie de ces émissions. La demande de logements en Algérie ne cesse d'augmenter, le secteur du bâtiment restera largement responsable de l'évolution de la demande énergétique, ainsi que les rejets de GES. En effet Au cours des dernières années, les autorités algériennes ont fait du développement de l'habitat une de ses priorités en lançant un vaste programme de construction en 2005, avec la construction d'un million de logements dont 450000 unités qui seront consacrées aux logements dans les zones rurales afin de maintenir les populations rurales en place et d'encourager leur retour des zones urbaines (PAER 2010), entre 2010-2014 construction de deux millions de logements dont 700000 logements ruraux (PROGRAMME), ainsi que le programme entre 2015-2019 qui prévoit la construction de 1,6 million de logements avec 400000 de ces logements publics seront prévus pour les zones rurales (PROGRAMME). Cependant, le bâtiment est un poste important dans la consommation énergétique en Algérie, et la construction de toutes ces maisons dont le niveau de performance énergétique est très mauvais, entraîne sûrement une augmentation significative de la consommation d'énergie, puisque le gouvernement les a construites sans tenir compte des conditions climatiques et des performances thermiques requises, ce qui conduira sûrement à une augmentation significative de la consommation

d'énergie. Ce qui nécessite un examen attentif, pour les défis majeurs dans la lutte contre le changement climatique et pour répondre à l'augmentation de la consommation énergétique, vue que le pays est confronté au problème de la limitation des réserves nationales fossiles et l'atteinte à l'environnement, il devra donc relever le défi de gérer efficacement ses ressources pour répondre à la demande d'énergie et protéger l'environnement. C'est dans ce cadre que l'Algérie a entrepris plusieurs démarches d'économie d'énergie dans le secteur de bâtiment, parmi l'adoption d'un programme ECO-BAT, proposé par APRUE (PAER 2013) qui vise la réalisation de 600 logement à haute performance énergétique basées sur les techniques de l'isolation thermique, le développement des chauffe-eaux solaires, l'installation des lampes à basse consommation et la réduction du recours à la lumière artificielle. Réparties sur 11 communes au niveau du territoire national, Sept projets parmi les onze prévus sont actuellement en cours de réalisation, et enregistrent un taux de réalisation très appréciable.

Le Centre National d'Etudes et de Recherches Intégrées du Bâtiment (CNERIB) en collaboration avec le Centre de Développement des Energies Renouvelables (CDER) ont eux aussi proposé un projet pilote d'une maison bioclimatique à haute efficacité énergétique qui a été sélectionné dans le cadre du concours lancé par le programme MEDiterranean ENergy Efficiency in the Construction sector (MED-ENEC), dans le but de sa généralisation sur l'ensemble du territoire national. Cette maison de type rurale qui utilise les énergies renouvelables est considérée dans cette étude.

Dans le premier chapitre de cette thèse, nous présentons les bases et les différents principes d'une architecture bioclimatique. On reconnaît que l'architecture bioclimatique apparaît comme une solution architecturale pour réduire les consommations énergétiques et donc les émissions de gaz à effet de serre en profitant au maximum des apports bénéfiques de l'environnement et plus particulièrement du soleil comme source d'énergie inépuisable. Dans le chapitre suivant nous passerons à la modélisation de la maison multizones couplée à un système de chauffage solaire, en utilisant le logiciel de simulation

dynamique TRNSYS. Nous effectuons, à l'aide des modèles présentés au chapitre précédent, une analyse des performances énergétiques de la maison considérée. Ensuite, pour valider nos résultats on les compare aux données expérimentales. Une étude comparative entre les résultats de la maison bioclimatique et ceux d'une maison conventionnelle seront nécessaires pour mettre en avant les avantages d'une architecture bioclimatique. À la fin une étude environnementale mettra l'accent sur la réduction des émissions de CO₂ en adoptant ce genre de construction.

Les enjeux énergétiques et climatiques mondiaux nous rappellent l'urgence d'une utilisation raisonnée des ressources et la nécessaire mutation du secteur du bâtiment. Premier consommateur d'énergie et deuxième émetteur de gaz à effet de serre, le secteur du bâtiment présente aussi d'autres effets, comme l'émission de déchets, les nuisances sonores, la consommation d'eau, et la pollution des nappes phréatiques, il serait donc temps de changer notre regard vers les habitats présentant des potentialités élevées d'économie d'énergie. L'habitat bioclimatique à haute efficacité énergétique devrait répondre à toutes ces attentes.

(APRUE 2014)

Consommation Energétique Finale de l'Algérie, Chiffres clés Année 2012. Alger, Edition 2014.

(BOURSAS 2013)

BOURSAS A., Etude de l'efficacité énergétique d'un bâtiment d'habitation a l'aide d'un logiciel de simulation, Mémoire de Magistère, Université de Constantine 1, Algérie, 2013.

(GIEC 2014)

5ème rapport du Groupe d'experts Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat (GIEC), Partie 3 : atténuation des changements climatiques, Avril 2014.

URL: <http://leclimatchange.fr/attenuations-des-changements/>

(MEA 2015)

Ministère de l'Energie Algérie, Bilan énergétique national 2014, édition 2015.

(PAER 2010)

Portail Algérien des Energies Renouvelables, L'Algérie s'essaye à l'habitat rural à faible consommation d'énergie, 2010. Article disponible en ligne.

URL: <https://portail.cder.dz/spip.php?article334>

(PAER 2013)

Portail Algérien des Energies Renouvelables, Plusieurs projets de logements à haute performance énergétique en cours de réalisation, 2013. Article disponible en ligne.

URL: <https://portail.cder.dz/spip.php?article3135>

(PROGRAMME)

Programme de développement quinquennal 2010-2014, Communiqué du conseil des ministres. Article disponible en ligne.

URL: <http://www.mae.gov.dz/images/sce/programme-quinquenal.pdf>

Chapitre I

Habitat bioclimatique

I.1 Introduction

La sensation de confort optimal a toujours été l'objectif de l'homme dans chaque nouvelle construction. Harmoniser ces constructions aux facteurs climatiques se faisait spontanément, mais depuis des siècles de nouvelles solutions pratiques en rapport avec le climat ont vu le jour (MAZARI 2012). De nombreux écrits et/ou travaux se rapportant à l'urbanisme ou à l'architecture bioclimatiques, et à la relation du milieu construit avec son environnement, faisaient déjà référence au patrimoine urbanistique et architectural arabo-musulman (BACHAR 2015). L'urbanisme traditionnel est représenté en Algérie par les médinas¹, dont la plus connue est la Casbah d'Alger (fondée en 1516) et les ksour sahariens. G. Guiauchain² (cité par OULEBSIR 2004), est parmi les premiers grands architectes qui a été séduit par l'art de construction arabe et a affirmé qu'il fallait rechercher « la philosophie des arts musulmans ». C'est en 1930, que vient J. Cotereau³ (cité par ALMI 2010), confirmer ces dires tout en regrettant que l'imitation de l'art arabe n'est prise en compte qu'en surface seulement, alors qu'on aurait dû en profiter de sa logique profonde. C'est en 1931 que vient le tour de l' initiateur de la Chartes d'Athènes, du mouvement moderne et de la « tabula rasa », Le Corbusier, d'être interpellé par l'esprit de l'architecture de la Casbah et de la pentapole du M'zab. Il disait lui-même en 1943 dans son ouvrage « Entretien avec les étudiants des écoles d'Architecture » (cité par GERBER 1994) : « *Bien que les éléments architecturaux préconisés eussent une attitude foncièrement nouvelle par l'agencement, la dimension et le matériau, leur soumission à la loi solaire donnait à nos propositions une parenté indiscutable avec les*

¹ Médina: désigne la partie ancienne d'une ville par opposition aux quartiers modernes de type européen. Ce terme est surtout employé dans les pays du Maghreb, en Espagne, en Afrique de l'Ouest et en Afrique de l'Est.

² George Guiauchain, architecte français en Algérie, comme son père Pierre Auguste et son fils Jacques. En 1889, G. Guiauchain a transformé en pensionnat de jeunes filles l'ancien palais ottoman (connu aujourd'hui comme le grand hôtel saint George à Alger).

³ Dès 1930, Jean Cotereau, ingénieur polytechnicien a publié une série d'articles dans la revue "Chantiers Nord-africains", dans les quels il recommande une architecture moderne inspirée du vernaculaire.

architectures arabes. Il sera possible de reconstituer non pas le style arabe...mais le confort arabe, c'est-à-dire la fraîcheur et l'abri, le soleil et la vue à volonté, et les contrastes si prodigieusement architecturaux des volumes vastes et petits» (BACHAR 2015). Ce qui nous laisse conclure que le bioclimatisme que l'on considère aujourd'hui comme un nouvel art de construction, n'est que le fruit d'une extension de certains savoir-faire que se transmettait jadis des «non-architectes» (MAZARI 2012).

Cependant, l'objectif d'une architecture bioclimatique est de lier harmonieusement le climat, l'habitant et le bâtiment. Un bâtiment bioclimatique doit être capable de tirer le meilleur parti du rayonnement solaire afin de maintenir des températures agréables, favoriser l'éclairage naturel et surtout réduire la consommation d'énergie ainsi que son impact sur l'environnement (LIEBARD & DE HERDE 2006).

I.2 Habitat bioclimatique

Quand l'idée d'avoir un habitat à vue le jour, s'était dans le but de protéger l'homme des aléas du climat. Avec le temps cet impératif s'est imposé mais s'est aussi développé vers



d'autres possibilités **Figure I.1 Maison bioclimatique conçue en 2015 à Auray (France), par l'architecte Patrice BIDEAU⁴**

comme rapprocher l'homme du climat environnant et profiter de ses bienfaits pour aboutir à un certain confort. Ce besoin de confort s'est cependant imposé dès la révolution industrielle, et a conduit à une augmentation sans cesse croissante de la consommation en énergie pour l'obtenir. C'est ici qu'intervient

⁴ Atelier atypique d'architecture écologique et bioclimatique depuis 1991.

l'architecture bioclimatique, qui grâce à sa conception intelligente des bâtiments, elle permet de réduire les besoins énergétiques, et d'interagir d'une manière naturelle avec l'environnement afin d'obtenir des conditions de vie adéquates et confortables (température, taux d'humidité, luminosité...etc.) (BENSALEM 2013; NAJI 2015).

I.3 Architecture bioclimatique

Souvent appelé « architecture climatique » ou « architecture naturelle », l'architecture bioclimatique est un concept qui prend en compte l'environnement lors de la construction. Dans le cas où l'environnement prend en compte le taux d'émission de gaz à effet de serre, la nature des matériaux de construction utilisés, la gestion de l'eau ou des déchets, dans ce cas ce type d'architecture est appelé « architecture écologique », « architecture durable », « architecture verte ». on parle d'« architecture solaire », ou d'« architecture passive » si l'intégration dans l'environnement est plus spécifiquement axée sur l'utilisation des ressources énergétiques, et plus particulièrement du soleil (CHESNE 2012).

L'architecture bioclimatique fait partie des premières notions apparues en matière de confort dans l'architecture. Le terme de «bioclimatique» fait référence à la bioclimatologie qui est traditionnellement liée à la relation entre le climat local et les organismes vivants. En 1963, une première fois par (OLGYAY 1963), l'auteur essayait de rétablir le lien fondamental existant entre l'environnement bâti et l'environnement naturel. Il a défini ainsi l'approche bioclimatique comme étant une harmonie entre la biologie, la climatologie, la technologie et l'architecture. La climatologie se réfère à l'exploitation de l'énergie ambiante, soleil et vent, la biologie dans la satisfaction des besoins physiologiques des hommes, la technologie par le contrôle de l'environnement à l'aide d'une technologie de calcul juste et finalement, l'architecture, point de convergence de ces trois domaines dans un seul art de construire développé par une adaptation empirique aux contraintes environnementales, sociales et

économiques locales. En ce sens, l'architecture bioclimatique est devenue un signe du régionalisme⁵ architectural (SZOKOLAY 2008).

Dans le contexte du bâtiment en général, et de l'habitat en particulier, l'architecture bioclimatique est liée à un troisième facteur dans la relation entre les organismes vivants et le climat : il s'agit ici de la forme et de la structure de l'habitat et ainsi que de ses dispositions purement architecturales (IZARD & GUYOT 1979 ; HYDE 2008). Par ailleurs, l'objectif principal de cette approche est de concevoir des bâtiments de manière « naturelle », c'est-à-dire en s'inscrivant pleinement dans leur environnement. L'habitat bioclimatique doit être capable tenir compte de plusieurs facteurs comme la végétation qui l'entoure, du relief du terrain sur lequel il est bâti mais aussi la course du soleil tout au long de la journée qui est le facteur le plus important. L'architecture bioclimatique permet d'établir un équilibre idéal entre les trois pivots suscités (figure I.2). Cela permet une réduction des besoins énergétiques et de créer une sensation de bien être dans les locaux avec des températures confortables, une humidité contrôlée et un éclairage naturel bien géré (CHESNE 2012; HAJ-HUSSEIN 2012).

L'architecture bioclimatique est une discipline de l'architecture, l'art de s'inspirer d'un site et de son environnement, afin de créer, au sein de l'habitation, les conditions optimales pour le bien-être et le confort des habitants.

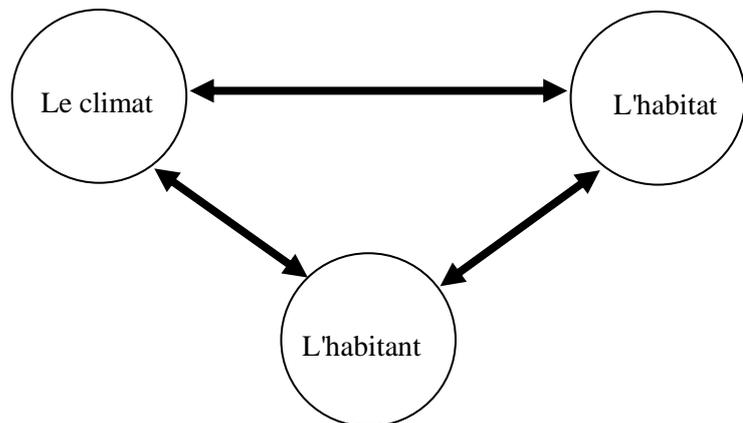


Figure I.2 L'équilibre entre les trois pivots de l'architecture bioclimatique (HAJ-HUSSEIN 2012)

⁵ Le régionalisme architectural s'oppose principalement à l'uniformité des constructions qui marquent l'architecture industrielle et entend remettre au goût du jour les styles traditionnels qui font l'identité des régions.

I.3.1 Stratégies de l'architecture bioclimatique

L'habitat bioclimatique tire parti du climat afin de rapprocher au maximum ses occupants des conditions de confort. Pour les climats tempérés, les variations de l'ensoleillement, du vent et des températures demandent de mettre en œuvre diverses stratégies adaptées aux différentes saisons.

Dans les climats tempérés, l'habitat bioclimatique doit mettre en œuvre diverses stratégies adaptées aux différentes saisons, afin de rapprocher au maximum l'occupant des conditions de confort. En hiver, l'habitat suit la stratégie du chaud: capter la chaleur du rayonnement solaire, la stocker dans la masse des matériaux de construction, la conserver par l'isolation et la distribuer dans le bâtiment, cela permet de se protéger du froid et profiter des apports solaires.

En été, l'habitat suit la stratégie du froid: se protéger du rayonnement solaire et des apports de chaleur, minimiser les apports internes, dissiper la chaleur en excès et refroidir grâce à la ventilation naturellement, cela permet de se préserver du soleil et, parfois ouvrir sa maison aux vents pour la refroidir. Pour les demi-saisons, l'enveloppe habitable doit pouvoir s'adapter de manière simple aux besoins par une combinaison de ces deux stratégies. L'habitat bioclimatique vise aussi à mieux capter et faire pénétrer la lumière naturelle, puis à mieux la répartir et la focaliser selon une stratégie d'éclairage naturel qui veuille aussi à contrôler la lumière pour éviter l'inconfort visuel. L'utilisation intelligente de la lumière naturelle permet de réduire la consommation électrique consacrée à l'éclairage (LIEBARD & DE HERDE 2006; COURGEY & OLIVA 2006).

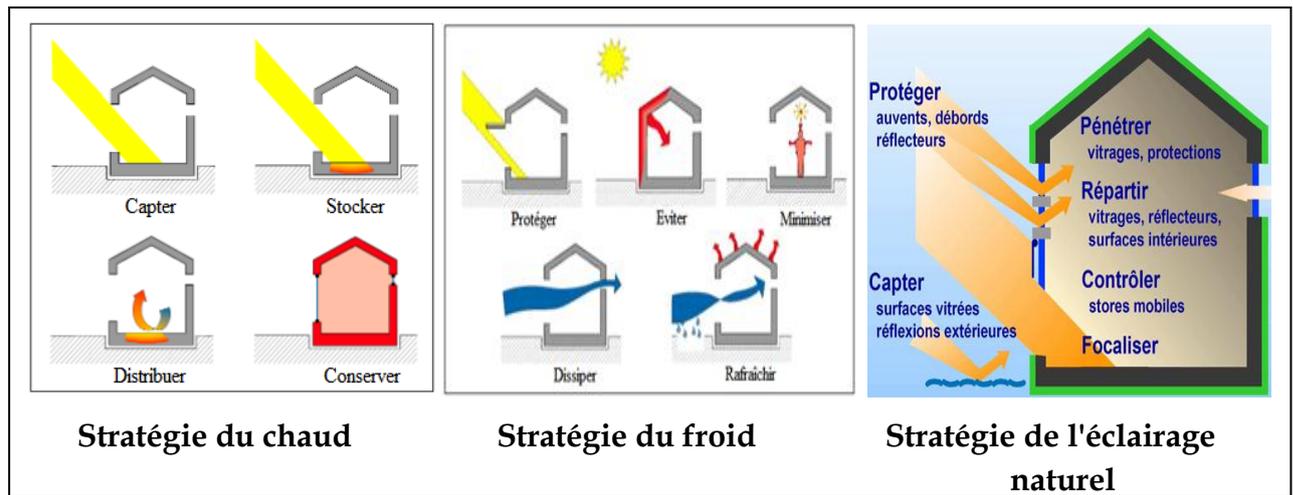


Figure I.3 Stratégies de l'architecture bioclimatique (TIXIER 2012; LIEBARD & DE HERDE 2006)

I.3.2 Principe et bases de l'architecture bioclimatique

« *Prévoir pour mieux concevoir* », tel est le principe fondamental de la conception bioclimatique. En effet profiter des avantages de l'environnement permettra au projet d'exploiter pleinement son potentiel. Chaque nouvelle construction suit trois phases (COSTIC 2011):

Première phase: un analyse environnementale complète du site , ainsi le constructeur disposera de tous les éléments ayant, de façon directe ou indirecte, un impact sur la conception du bâtiment.

Deuxième phase: être en parfaite harmonie avec le site, en tirant le meilleur parti de ses avantages et s'adapter avec ses contraintes, ce qui aboutira à une construction intrinsèquement performante.

Troisième phase: le choix pertinent des solutions architecturales pour la construction. Chaque site, est unique par ses caractéristiques environnementales, il convient par conséquent de choisir des solutions architecturales au cas par cas en s'inspirant des stratégies globales de l'architecture bioclimatique décrite précédemment.

Composer avec le site permet à l'architecture bioclimatique de réduire les besoins énergétiques et de créer une sensation de bien-être aux habitants. Ses principes sont fondés sur un choix judicieux de la forme et l'orientation du bâtiment, de son implantation, de la disposition des espaces intérieurs, et aussi des matériaux utilisés pour la construction (COURGEY & OLIVA 2006).

Afin d'optimiser le confort des occupants tout en préservant le cadre naturel de la construction, de nombreux paramètres sont à prendre en compte. Pour faire le tour des principales bases de l'architecture bioclimatique, nous commencerons par les bases de conception d'ensemble qui conditionnent le choix d'un parti architectural ⁶, ensuite nous entamerons les bases de conception de détail.

I.3.2.1 Les bases de conception d'ensemble

1 Implantation

Le choix de l'implantation oblige à une étude urbanistique du site. Ses objectifs sont l'identification des vents dominants afin d'éviter la prise de vents froids tout en favorisant la ventilation naturelle, aussi l'incidence du soleil pour capter sa lumière et sa chaleur (figure I.4). Cette analyse permettra une délimitation de zones potentiellement intéressantes afin de procurer le confort nécessaire aux occupants.

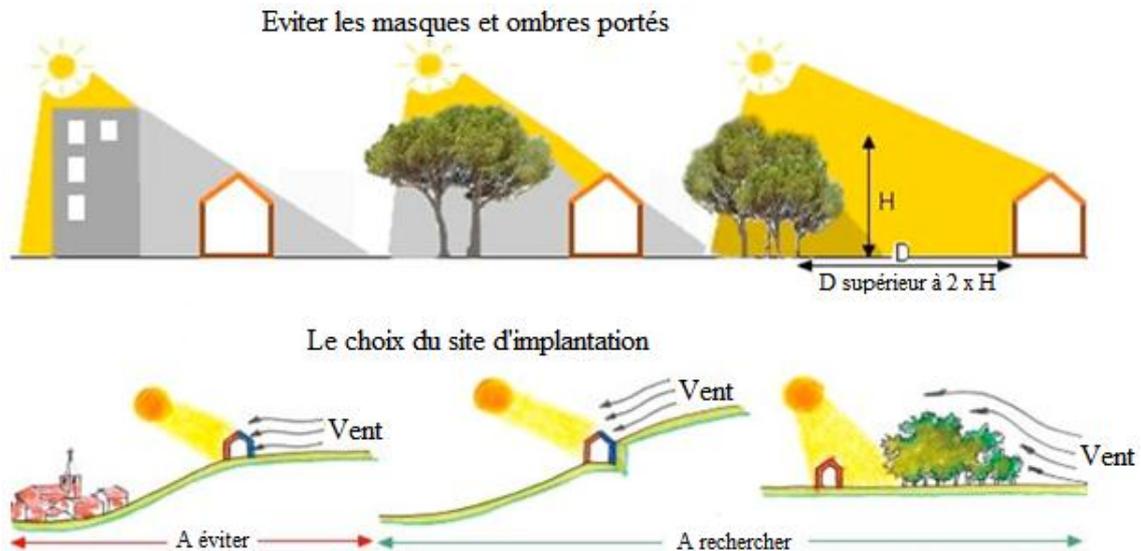


Figure I.4 Principes d'implantation d'un édifice (ECOREA 2010)

⁶ Le parti architectural d'un édifice définit les dessins techniques et le plan de construction, qui englobent toutes les décisions en matière de conception, qui doivent être examinés et approuvés officiellement avant que les travaux commencent.

La localisation d'un bâtiment bioclimatique requiert une analyse de bon nombres de paramètres classés selon trois types (BERGHOUT 2012; MAZARI 2012; COSTIC 2011):

1-Environnement: type de région, nature du sol, végétation, profil du terrain, altitude et latitude, vue, bruit...etc. la prise en compte de ces paramètres permettra une protections naturelles au vent et au soleil estival par la topographie du terrain naturel et la végétation existante, et de l'ensoleillement hivernal en évitant les masques portés par la végétation, le relief et l'environnement bâti, ce qui aura un impact directe sur les apports solaires ainsi que sur le confort visuel.

2- Climat: l'ensoleillement, température, type de temps, luminosité, précipitations, humidité, vent...etc. La prise en considération de ces paramètres permet de profiter des apports solaires, plus ces apports sont importants, plus les besoins thermiques pour le chauffage en hiver et pour l'électricité sont réduits. Si en hiver, le bâtiment doit profiter de ces apports, en été il faut penser à éviter le risque d'échauffement excessif.

3- Autres: le contexte urbain, législation, matériaux locaux, alimentation en eau, en gaz ou en électricité...etc. Cette analyse offrira la possibilité au maître d'œuvre de limiter les effets des occupants sur l'environnement, et l'utilisation des matériaux locaux pour contribuer à la diminution des émissions de gaz à effet de serre.

L'implantation a une influence non-négligeable sur les besoins calorifiques et sur le confort (thermique, visuel...etc.). Mais le défaut d'apports solaires passifs peut être compensé par des améliorations coûteuses des caractéristiques thermiques de l'enveloppe du bâtiment.

2 Forme et compacité

La nature et la superficie de l'enveloppe d'un bâtiment est un facteur important dans ses échanges avec l'environnement. les déperditions thermiques du logement se font par renouvellement d'air et à travers l'enveloppe ce qui rend le choix de la compacité du bâtiment source potentielle d'économies d'énergie.

Ainsi, une surface habitable avec une forme compacte est plus économe en énergie qu'une forme éclatée vue que les déperditions sont proportionnelles à la surface d'échange entre l'intérieur conditionné et l'extérieur (BERGHOUT 2012).

La compacité est mesurée par un coefficient de forme, C_f , qui est le rapport entre la surface de l'enveloppe S en m^2 et le volume habitable V_h en m^3 .

$$C_f = \frac{S}{V_h} \quad (I.1)$$

Plusieurs facteurs sont pris en considération lors de l'évaluation thermique d'un bâtiment, ce qui fait de la compacité un critère intéressant mais difficile à appliquer. On peut, à partir d'une analyse géométrique (figure I.5), comparer la variation de la compacité par rapport à la forme, la taille et la proximité d'autres volumes.

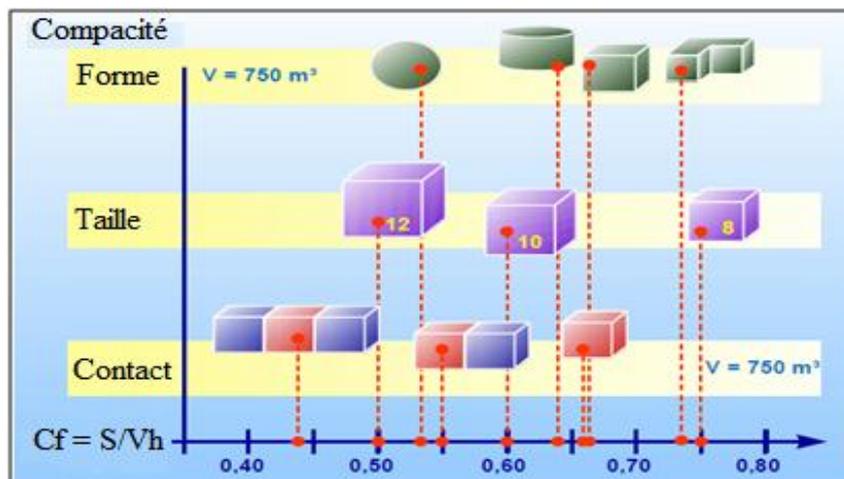


Figure I.5 Impact de la forme, la taille et la proximité d'autres volumes sur la compacité de formes simples (LIEBARD & DE HERDE 2006)

- La forme (pour un volume constant) : les formes les plus compactes sont les formes sphériques qui ont un faible C_f . Ces formes ont largement suscité l'imagination des architectes dans les années 70 avec des structures polygonales

complexes, visant à économiser les matériaux et l'énergie en réduisant l'enveloppe (LIEBARD & DE HERDE 2006).

- La taille (pour une forme constante) : la taille influence aussi directement la compacité du bâtiment. Pour une forme définie, une augmentation de la taille entraîne automatiquement un faible Cf, donc une forme plus compacte

- Le mode de contact (pour forme et volume constants) : le mode de contact entre volumes influence également la compacité. Pour le même volume, on remarque que pour le cas des maisons mitoyennes le Cf est plus faible par rapport à celui d'un pavillon car les murs mitoyens sont disposés entre deux espaces chauffés et ne seront pas considérés comme des surfaces déperditives. C'est pourquoi, la législation de nombreux pays encourage certaines typologies urbaines (rangées de maisons mitoyennes et immeubles collectifs). (LIEBARD & DE HERDE 2006).

Selon (BERGHOUT 2012) la forme optimale d'un bâtiment correspond à celle qui lui permet de perdre un minimum de chaleur en hiver et de gagner un maximum de fraîcheur en été.

Dans la définition du Cf la répartition et la surface du vitrage, ainsi que l'orientation du bâtiment sont négligés, c'est ce qui a fondé les critiques de ce coefficient. Mais pour que l'impact énergétique de la forme architecturale puisse devenir sous certains climats moins primordial à partir du moment où un bâtiment est bien isolé, les répercussions de la forme sur le coût global de la construction ne peut pas être négligé (FERNANDEZ & LAVIGNE 2009).

3 L'orientation

Dans le but d'optimiser le confort des occupants tout en préservant le cadre naturel de la construction, une attention toute particulière doit être portée à l'orientation du bâtiment: l'été, il s'agit de limiter les apports solaires et d'évacuer la chaleur, alors qu'en hiver, il convient de profiter au maximum des apports solaires, et de se protéger des vents dominants. De façon générale, il est préférable d'avoir une exposition principale Sud à toute autre exposition, car c'est la seule à être à la fois avantageuse été comme hiver. En outre, une orientation Sud apporte évidemment un éclairage naturel satisfaisant aux

heures les plus "intéressantes" de la journée, à midi et l'après-midi, ce qui garantira en plus des économies de chauffage une économie d'éclairage à condition que la maison aura la possibilité de faire des ouvertures au Sud-est, Sud ou Sud-ouest. En dehors du Sud, l'exposition principale orientée Nord, privera le logement de tout apports solaires utiles en saison froide. Les expositions principales Ouest et Est sont à éviter, car les rayons du soleil frappent de plein fouet les ouvertures, qui sont alors difficiles à protéger. Ceci est particulièrement dérangeant l'été, donc les grandes surfaces vitrées à l'Ouest sont déconseillées. L'orientation du bâti doit également être pensée de manière à avoir des parois aussi étanches que possible à l'air, et qui minimisent l'effet des vents indésirables (vents froids d'hiver et vents chauds d'été) (MOLLE & PATRY 2013; GUIDE 2006; RTE).

«Les théories préfèrent l'orientation Sud, car elle bénéficie des radiations intenses en hiver et des radiations minimales ou basses en été » (OLGAY & OLGAY 1963). D'autres chercheurs (ANDERSSON et *al.* 1985; AL-OBAIDI & WOODS 2006; PORRITT et *al.* 2010; KORANTENG & ABAITEY 2010; BEKKOUCHE et *al.* 2013) ont démontré, par leurs calculs, que cette orientation reste la plus favorable, quelle que soit la latitude. Le seul fait d'orienter correctement une habitation et de positionner adéquatement ses fenêtres par rapport au parcours du soleil, réduit sa consommation énergétique pour le chauffage, pour la climatisation et même pour l'éclairage (MISSOUM 2011). La figure I.6 illustre ce dernier point en comparant les besoins annuels de chauffage d'une habitation selon l'orientation et la proportion de ses vitrages (rapport de la surface vitrée à la surface de la façade).

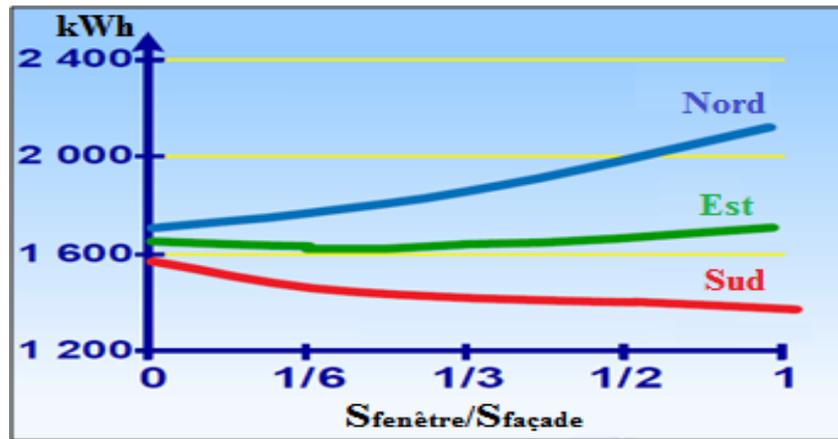


Figure I.6 Variation des besoins annuels de chauffage d'une habitation en fonction de l'orientation et de la proportion de surface vitrée (LIEBARD & DE HERDE 2006)

On constate une diminution importante des besoins de chauffage pour une orientation Sud, alors que ces besoins ne cessent d'augmenter pour une orientation Nord. L'écartement progressif des courbes reflète que la fenêtre : élément capteur de chaleur au Sud, devient surface déperditive quand elle est placée au Nord. En effet, la façade Sud du bâtiment reçoit, en hiver, près de trois fois plus de soleil que les façades Est et Ouest (MAZRIA 2005). Les faces Est et Ouest du bâtiment seront à étudier avec prudence vue qu'elles correspondent à une incidence quasiment perpendiculaire au soleil et seront exposées aux apports solaires maximums en été, ce qui occasionne le plus souvent des surchauffes et une gêne visuelle. Le fait de bénéficier du soleil levant et du soleil couchant n'offre donc pas que des avantages. Le Nord est la partie la plus froide, c'est la façade qui reçoit très peu de soleil quelle que soit la saison. Il faudra donc s'en protéger et limiter les ouvertures afin de minimiser les déperditions thermiques du bâtiment (BERGHOUT 2012).

Afin de capter un maximum de lumière et de chaleur gratuite (apports passifs), il faut s'ouvrir au Sud. Le fait d'opter pour de grandes ouvertures au Sud sera bénéfique pour le confort des habitants, à condition de savoir éviter les surchauffes l'été. Aussi, une exposition aux vents est favorable en été, sans oublier de s'en protéger en hiver éventuellement par l'implantation de barrières végétales.

4 Organisation de l'espace intérieur

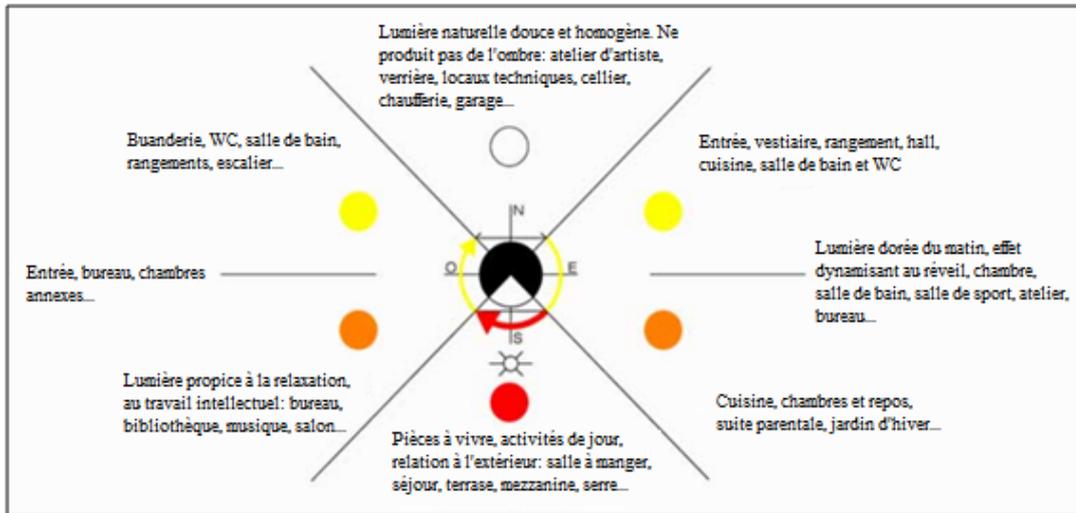


Figure I.7 Répartition des différentes pièces de la maison (CHEVILLOTTE)

La figure I.7 récapitule les règles de base qui régissent l'organisation intérieure des espaces. La façade Sud étant la plus agréable du point de vue thermique (apports solaires et lumière), il est préférable d'y placer les pièces de vie, telles que le salon et les chambres principales afin de profiter au mieux de tous les avantages de cette orientation. Les chambres principales peuvent également être orientées au Sud-est et à l'Est, afin de profiter du lever du soleil tout en restant fraîches en fin de journée. Pour le choix de l'orientation de la cuisine, ceci dépend de votre mode de vie. Si elle est considérée comme une pièce de vie une orientation Sud est conseillée. Une orientation Sud-est vous permet aussi de prendre le petit déjeuner en profitant du soleil matinal. En revanche, pour éviter les surchauffes e été, il est préférable de la placer au Nord : en effet, c'est une pièce qui dégage beaucoup de chaleur à cause des appareils de cuisson (FOURA 2007).

Les salles de bain sont des pièces ne nécessitant que peu d'ouvertures et d'ensoleillement, il est donc conseillé de les placer au Nord. C'est le cas aussi des pièces utilitaires (entrée, garage, atelier, débarras...) qui ne nécessitent pas de température confortable. Ces espaces peu ou non chauffés, appelés espaces tampons, se comporteront comme des isolants thermiques et diminueront les pertes de chaleur et donc la dépense énergétique durant l'hiver. Durant l'été, ils se comporteront aussi comme des isolants thermiques, puisqu'ils atténuent les

rayons solaires le jour et favorisent l'évacuation de chaleur le soir (FOURA 2007).

I.3.2.2 Les bases de conception de détails

1 Les fenêtres

Les fenêtres, portes-fenêtres et baies sont considérés comme des paramètres essentiels lors de la conception d'un bâtiment bioclimatique. Leur rôle principal est d'assurer le confort visuel et thermique des occupants. Les vitrages sont responsables des pertes thermiques, mais ils peuvent aussi être le point de passage d'un important apport solaire en hiver. Une bonne conception des ouvertures doit donc tenir compte de certains paramètres, comme le type de vitrage, l'orientation, le type de protection solaire associée...etc. (FOURA 2007). Compte tenu de ses effets sur l'éclairage naturel et son potentiel sur les apports solaires, les vitrages se caractérisent par trois facteurs thermiques, à savoir :

Le facteur solaire (F_s) : Chaque type de vitrage est affecté d'un coefficient de transmission énergétique, dit « facteur solaire », qui s'exprime en % et caractérise la quantité totale d'énergie que laisse passer un vitrage par rapport à l'énergie solaire incidente. Il mesure donc la contribution d'un vitrage à l'échauffement de la pièce. Plus le facteur solaire est petit, plus les apports solaires sont faibles (DICTIONNAIRE-ENVIRONNEMENT).

Le facteur thermique (U_f) : La capacité d'un vitrage à s'opposer à la fuite des calories est exprimée par le coefficient de transmission thermique qui représente la quantité de chaleur traversant un mètre carré de vitrage par degré de différence entre la température des ambiances situées de part et d'autre de la paroi ($W/m^2 \cdot ^\circ C$). L'amélioration du coefficient de transmission d'un vitrage se fait en doublant voire en triplant le vitrage. Un faible coefficient thermique du vitrage signifie une meilleure isolation thermique (BIOCLIMATISME).

Le facteur lumineux : Le coefficient de transmission lumineuse est le pourcentage de lumière solaire qui entre dans le bâtiment au travers du vitrage, qui ne mesure pas l'énergie calorifique transmise, mais seulement la lumière (on l'appelle aussi coefficient de transparence). Lorsque l'énergie solaire est interceptée par une paroi vitrée, une partie est réfléchiée vers l'extérieur, une

partie est transmise à l'intérieur et enfin une partie du rayonnement est absorbée par le vitrage (VERRE).

La nature du vitrage a une influence sur la transmission énergétique du rayonnement solaire selon les caractéristiques suivantes (MAZARI 2012) :

- * Les vitrages clairs sont connus pour leurs haute capacité de transmission de lumière et de rayonnement solaire.

- * Les vitrages absorbants sont teintés et permettent au verre d'augmenter la fraction absorbée du rayonnement solaire au profit de la fraction transmise. Ils réduisent sensiblement la lumière et l'énergie transmise.

- * Les vitrages réfléchissants sont caractérisés par la présence d'une très fine couche métallique réfléchissante et transparente, qui accroît la part du rayonnement solaire réfléchi. Ils sont surtout utilisés en bâtiment tertiaire dans le principal but de limiter l'éblouissement et les surchauffes en été.

Les ouvertures et fenêtres jouent un rôle important dans la relation bâtiment-occupant- environnement. En effet, elles établissent le contact entre l'extérieur et l'intérieur et permettent ainsi d'améliorer le bien-être de l'occupant (LIEBARD & DE HERDE 2006). Celles-ci influent aussi sur la consommation d'énergie à travers quatre aspects (FOURA 2007; LIEBARD & DE HERDE 2006; RTE):

- C'est par elles que la majeure partie du rayonnement solaire pénètre. Elles doivent donc être conçues de façon qui permet de profiter au maximum de ce rayonnement pendant l'hiver, mais en évitant les surchauffes en été.

- A cause de leur résistance thermique plus faible que celle des parois opaques, elles engendrent des pertes thermiques importantes. Elles doivent donc être conçues de manière à minimiser ces pertes durant l'hiver.

- Elles seules assurent un renouvellement de l'air de la maison, c'est pour cette raison qu'elles doivent être pensées de façon à permettre une bonne ventilation tout en rejetant les infiltrations désagréables qui les accompagnent comme la pollution, le bruit...etc.

- Elles constituent une source de lumière naturelle, qui devrait être suffisante pour limiter les besoins d'éclairage artificiel. Tous ces paramètres devraient être pris en compte lors d'une bonne conception des ouvertures.

La taille des fenêtres à l'Est à l'Ouest et particulièrement au Nord doit être aussi réduite que possible avec un faible coefficient de déperdition thermique (U_f), car ces ouvertures laissent peu ou mal pénétrer le rayonnement solaire et entraînent des entrées d'air froid désagréables en hiver. Contrairement au côté Sud où il est conseillé de placer de grandes fenêtres, car elles capteront un maximum d'énergie durant l'hiver, et de favoriser les baies vitrées à la façade Sud. A titre d'exemple, un agrandissement de la surface vitrée au Sud de 15 % à 50 % de la façade, permettra de réduire la facture de chauffage de 20% (dans le Nord de l'Algérie). Les protections nocturnes (persiennes, stores,...) isolantes placées à l'extérieur doivent être préconisées par rapport aux fenêtres. (VALCEA 1986; RTE)

2 Les protections solaires

Avoir des ouvertures permettant de profiter de l'ombre est un facteur essentiel du confort d'été, c'est ce qui impose les protections solaires. Elles empêchent l'insolation directe des ouvertures tout en laissant passer la lumière.

Parmi les types de protections solaires qui peuvent exister, on retrouve des protections légères, amovibles ou orientables (store, brise-soleil orientable) (figure I.8). Avec ces différents types de protection solaire, on peut adapter constamment la protection selon les conditions extérieures et besoins intérieures, et permettent une protection efficace en été tout en bénéficiant des apports solaires en hiver (FOURA 2007; GUIDE-PRATIQUE 2010; RTE).



Figure I.8 Protections solaires extérieures mobiles (GUIDE-PRATIQUE 2010)

Les protections solaires peuvent également faire partie intégrante de la construction elle-même (figure I.9) : brise-soleil, écrans, auvents, balcons, débords de toit...etc. Là aussi on retrouve l'avantage indéniable d'une ouverture

située au Sud, puisqu'elle est assez facile à protéger ; un store ou un brise-soleil suffisent à l'ombrer (FOURA 2007).

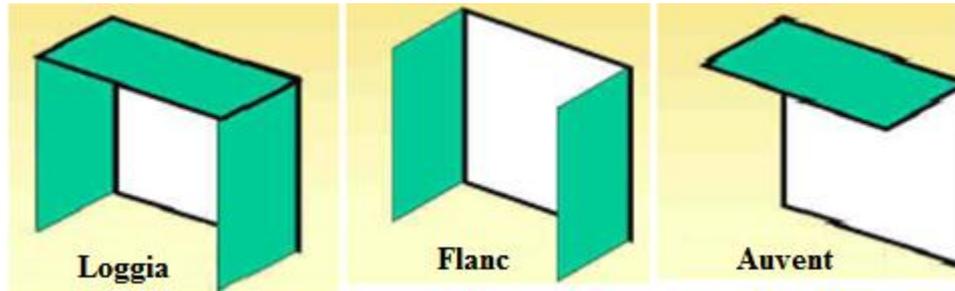


Figure I.9 Protections solaires extérieures fixes (MAZARI 2012)

Les protections solaires peuvent également être liées à l'environnement (figure I.10). On retrouve la végétation à feuilles caduques qui procure un ombrage naturel saisonnier. On recherchera des essences avec peu de branchages, pour avoir un ombrage minimum en hiver, mais avec un feuillage dense pour la saison estivale (AHMED ALI 2012).



Figure I.10 Protections solaires par la végétation
1 (LIEBARD & DE HERDE 2006); 2 (MAZARI 2012)

3 Les serres

La serre est un des dispositifs les plus intéressants de l'architecture bioclimatique. Les serres bioclimatiques également appelées « serres solaires » ont un rendement peut couvrir de 20 à 40 % des besoins de chauffage de la maison en hiver, et contribuent également au rafraîchissement en été. Elles sont considérées comme des espaces tampons à certains moments, et des espaces à vivre très agréables à d'autres moments. L'orientation optimale d'une serre est le plein Sud. Mais principalement en réhabilitation, on peut être amené à s'en écarter sensiblement. On estime qu'un écart de 20° à 30° par rapport au Sud ne

réduit que de quelques pourcentages, les apports solaires d'un jour moyen d'hiver (COURGEY & OLIVA 2006).

Fonctionnement :

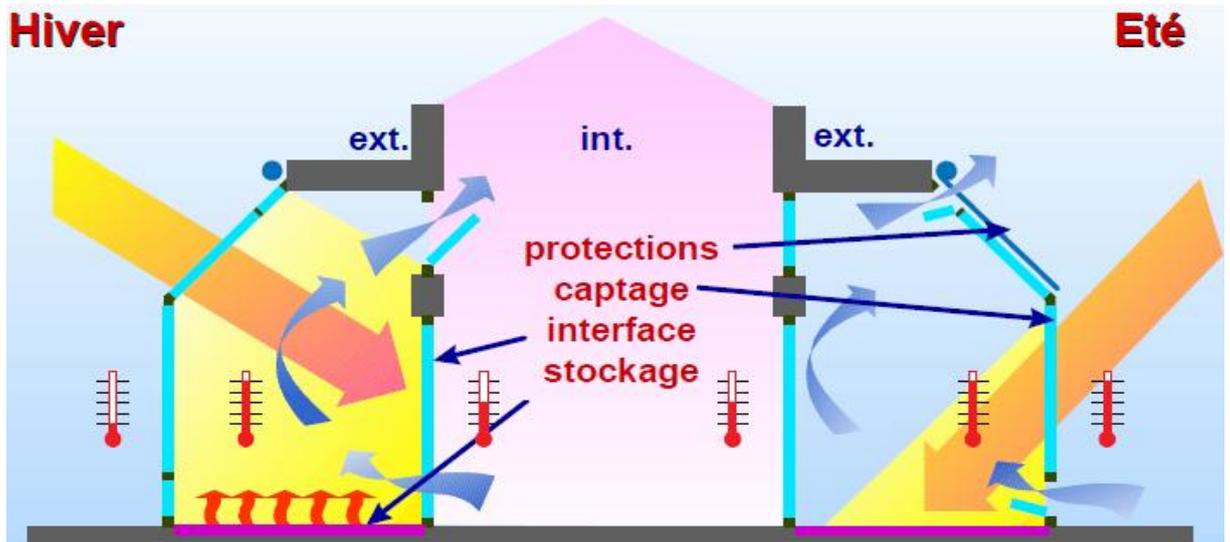


Figure I.11 Fonctionnement d'une serre en hiver et en été (LIEBARD & DE HERDE 2006)

Fonctionnement en hiver: dès que le soleil frappe le vitrage extérieur de la serre, l'air réchauffé va pénétrer dans l'habitat via l'ouverture des baies de la paroi mitoyenne. Ce premier réchauffement se double d'un réchauffement par conduction: les parties maçonnées de la paroi du fond s'échauffent et retransmettent lentement leurs calories. Simultanément, le sol de la serre absorbe lui aussi une partie du rayonnement solaire. La nuit, les calories accumulées dans le mur intermédiaire durant la journée rayonnent vers l'intérieur. Et dans la serre, les calories accumulées dans la dalle et une partie de celles accumulées dans le mur de fond rayonnent vers cet espace tampon, limitant ainsi la baisse des températures dans celui-ci (COURGEY & OLIVA 2006).

Fonctionnement en été: le rayonnement solaire qui traverse le vitrage de la serre est limité du fait de son angle d'incidence. Le réchauffement de l'air qui à l'intérieur de la serre permet une ventilation naturelle grâce à des ouvertures spécifiques pratiquées en bas et en haut du vitrage. Avec un dispositif de protection solaire, la serre restera agréable même durant les journées de

surchauffes. Toutefois, les baies de la paroi mitoyenne devront rester fermées afin de ne pas produire un renouvellement d'air important qui le réchaufferait la maison. Durant les nuits d'été, les grilles de ventilation de la serre et les ouvertures entre serre et habitat laisseront passer généralement l'air et permettront de rafraîchir le bâtiment (COURGEY & OLIVA 2006).

À titre d'exemple on peut citer le dispositif de façade double peau⁷, qui est constituée d'une paroi extérieure entièrement vitrée et d'une paroi intérieure plus massive (figure I.12). Cette dernière est composée d'une paroi vitrée et d'une autre paroi opaque capable d'emmagasiner la chaleur. La façade double peau a le même fonctionnement que celui des serres, à la différence qu'elle ne dispose pas d'espace habitable. Elle est intéressante pour des orientations proches du Sud $\pm 30^\circ$; mais l'orientation Ouest est à éviter pour cause de surchauffe (GRATIA & DE HERDE 2006).

L'espace ventilé, dans la plupart des cas, séparant les deux vitrages (appelé

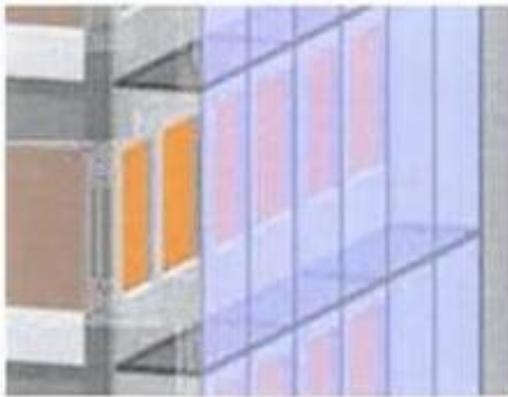


Figure I.12 Façade double peau
(GRATIA & DE HERDE 2006)

cavité) varie entre 20 cm et 2 m. Cette ventilation peut être mécanique, naturelle ou mixte. Enfin, ces façades sont dotées d'une protection solaire placée à l'intérieur des cavités qui peut être contrôlés automatiquement ou manuellement. Plusieurs types de protections solaires sont possibles (stores, lamelle ...etc.) (GRATIA & DE HERDE 2006).

4 Les matériaux de construction

Avant tout construction, une connaissance approfondie des matériaux utilisés est importante lors d'une conception bioclimatique. Les matériaux sont utilisés

⁷ Façade double peau: C'est une façade constituée d'une paroi extérieure entièrement vitrée et d'une paroi intérieure plus massive. Cette dernière est composée de parois vitrées et de parois opaques capables d'accumuler la chaleur.

selon les performances thermiques que l'on cherche pour les différentes parois du bâtiment, car chaque matériau présente certaines caractéristiques physiques particulières (conductivité thermique⁸, capacité thermique⁹, diffusivité thermique¹⁰, effusivité thermique¹¹). Ces caractéristiques définissent la vitesse à laquelle le matériau gère les flux thermiques. Si l'on cherche à assurer une bonne résistance thermique à l'enveloppe, les matériaux isolants à faible conductibilité thermique seront utilisés afin de lutter contre la fuite des calories et obtenir un bâtiment performant. La bonne inertie thermique du bâtiment sera assurée par les matériaux à forte capacité thermique qui permettent de capter les apports de chaleur pour les utiliser plus tard dans la journée en saison hivernale ou pour les dissiper la nuit en saison estivale (COURGEY & OLIVA 2006). Une paroi doit également assurer un confort hygrothermique¹² qui garantit une température de confort pendant toute l'année et un taux d'humidité de 40 à 60% et une différence maximale de température de 3° C entre l'air intérieur et les parois. Ceci doit empêcher la sensation d'étouffement produite par excès d'humidité ainsi que la moisissure qui dégrade certains types d'enveloppes des bâtiments. De plus, pour que l'enveloppe d'un bâtiment soit thermiquement

⁸ Conductivité thermique: la propriété d'un matériau à transmettre la chaleur par conduction. Elle correspond au flux de chaleur qui traverse en un matériau d'une surface de 1m² et de 1m d'épaisseur pour un écart de température de 1°C entre les 2 faces de cette paroi.

⁹ Capacité thermique: C'est la capacité du matériau à emmagasiner la chaleur par rapport à son poids. Elle caractérise la quantité d'énergie à apporter à 1 kg de matériau pour élever sa température de 1°C.

¹⁰ Diffusivité thermique: C'est la vitesse à laquelle la chaleur se propage par conduction dans un corps. Elle dépend de la capacité du matériau à conduire la chaleur (sa conductivité thermique) et de sa capacité à stocker la chaleur (capacité thermique). Elle est exprimée en mètre carré par seconde (m²/s).

¹¹ Effusivité thermique: Elle indique la capacité des matériaux à absorber un apport de chaleur. Plus l'effusivité est élevée, plus le matériau absorbe d'énergie sans se réchauffer notablement. Au contraire, plus elle est faible, plus vite le matériau se réchauffe. Elle est exprimée en (J/m².°C.s^{-1/2}).

¹² Confort hygrothermique: Il est défini comme étant la sensation que ressent une personne par rapport à la température et à l'humidité ambiantes de la pièce où elle se trouve.

efficace, elle ne doit présenter aucune insuffisance telle que des défauts d'étanchéité à l'air ou des ponts thermiques¹³. Lors d'une construction bioclimatique, il convient d'utiliser les matériaux disponibles à proximité. Ces matériaux locaux seront mieux adaptés au climat et limiteront le coût de construction. Ainsi les constructions en pierre locale sont adaptées au climat à forte variation de température journalière. Les constructions en bois sont adaptés aux climats dont l'hiver est très rigoureux (climat de montagne), ils permettront une rapide montée en température du bâtiment. Les constructions en terre crue ou en utilisant du sable, permettent eux d'accumuler les fortes radiations solaires et montées en température et ainsi limiter les risques de surchauffe (COURGEY & OLIVA 2006; ASSAUT-VERT).

5 Isolation

5.1 Isolation de l'enveloppe

Pour un bon fonctionnement de la maison bioclimatique l'isolation thermique est cruciale. En hiver, elle limite les déperditions thermiques et permet de garder le bâtiment bien au chaud. En été, elle rafraîchit l'habitat en réduisant les apports de chaleur. L'isolation permet aussi d'éviter les condensations et la désagréable sensation de "mur froid" (SALOMON 2000).

Deux possibilités s'offrent au concepteurs et réalisateurs pour isoler une paroi (ISOLER 2016) :

- Isolation par l'intérieur : ce qui consiste à isoler un bâtiment de l'intérieur. C'est vrai que ce principe réduit la surface habitable des pièces sans éviter les ponts thermique mais reste très utilisé par les constructeurs pour sa facilité de mise en œuvre qui n'apport aucune modification de l'aspect extérieur de la maison, et pour son coût qui est relativement peu élevé.
- Isolation par l'extérieur : elle consiste à isoler le bâtiment de l'extérieur. Bien qu'elle soit une solution coûteuse, mais elle est considérée comme la

¹³ Ponts thermiques: Ce sont des points de jonction du bâtiment où il y a une rupture totale ou partielle de l'isolation.

meilleure solution, car de plus qu'elle ne modifie pas les surfaces habitables, elle supprime les ponts thermiques.

Ainsi, dans le cas où les habitants préfèrent conserver les anciens murs de la maison, alors l'isolation choisie pour la rénovation, sera l'isolation par l'extérieur. A l'inverse, l'isolation par l'intérieur sera utilisée pour sauvegarder la façade extérieure de la maison. Dans le cas d'une maison déjà isolée, le constructeur pourra conserver l'isolation existante et améliorer les performances thermiques en changeant les fenêtres, les volets et les portes.

Isolants

Les isolants sont des matériaux généralement légers, vendus sous différentes formes (panneaux, rouleaux, vrac...). Ils sont caractérisés par :

Le coefficient de conductivité thermique (λ) qui s'exprime en $W/m.^{\circ}C$. Ce coefficient représente le flux de chaleur (en Watt) que traverse 1 mètre de matériau homogène, pour un écart de température de $1^{\circ}C$ entre les deux côtés de la paroi. La conductivité thermique λ varie selon les matériaux, et s'étale sur une importante plage, en général plus la conductivité thermique est faible plus le matériau est considéré comme isolant. Selon la RT2012¹⁴, un matériau est considéré isolant si $\lambda < 0.065 W/m.^{\circ}C$ (FOURA 2007).

La résistance thermique (R), est la capacité d'une paroi à s'opposer au transfert de chaleur. La résistance thermique évite la perte de chaleur de la maison, donc plus elle est élevée, plus il y a économie d'énergie. L'inverse de cette résistance thermique est le coefficient de transmission thermique, noté U ($W/m^2.^{\circ}C$). Si on considère l'épaisseur d'isolant (e) en mètre, ces termes seront liés par la formule (FOURA 2007) :

$$R = \frac{1}{U} = \frac{e}{\lambda} \quad (I.2)$$

¹⁴ RT 2012: Réglementation Thermique qui s'applique en France aux permis de construire de certains bâtiments tertiaires dès le 28 octobre 2011 et de tous les bâtiments résidentiels à partir du 1^{er} janvier 2013.

Malgré qu'elle est rarement prise en compte, La capacité des matériaux à emmagasiner de la chaleur est essentielle. Elle est appelée l'inertie thermique¹⁵. La chaleur spécifique d'un matériau (capacité thermique en J/kg.°C) ainsi que sa densité¹⁶(masse volumique en kg/m³) déterminent son inertie thermique. Plus la chaleur spécifique d'un matériau est élevée, plus il peut fournir ou absorber de chaleur sans que sa température ne varie beaucoup. En règle générale, plus le matériau est dense et lourd, meilleure est son inertie.

Le choix d'un matériau isolant est primordial, pour l'hiver, il conviendra de choisir un isolant ayant une faible conductivité thermique, une épaisseur suffisante et une mise en œuvre adéquate. Pour l'été, il conviendra de choisir des matériaux isolants à capacité thermique élevée permettant de stocker suffisamment de calories sans s'échauffer notablement afin de réduire l'amplitude entre les températures minimales et maximales extérieures quotidiennes. En cette saison estival, les isolants devront aussi permettre un déphasage qui empêche la chaleur de la journée d'arriver à l'intérieur de la maison que le soir lorsque la fraîcheur se fait sentir, pour cela les isolants à faible diffusivité thermique qui ralentissent le passage du flux de chaleur seront choisis (COURGEY & OLIVE 2006).

De nombreux isolants existent aujourd'hui, aussi bien au niveau de leur composants que de leur conditionnement et de leur épaisseur. On peut les classer comme suit (SCHITTICH 2003) :

Isolants naturels

Les isolants naturels peuvent être d'origine végétale, animale ou sédimentaire, ils peuvent aussi être fabriqués en utilisant des matériaux recyclés comme le liège, et en général nécessitent moins d'énergie pour leur fabrication, ce qui est un impact positif pour notre environnement. Mais l'argument qui motive leurs utilisations, c'est qu'ils sont moins nocifs pour notre santé:

¹⁵ Inertie thermique: La capacité d'un matériau à stocker de la chaleur et à la restituer petit à petit.

¹⁶ Densité: Il s'agit de la masse du matériau par unité de volume.

Le liège : provient du chêne liège, mais peut provenir du recyclage des bouchons pour un faible impact écologique. Disponible en panneaux ou en vrac, il est résistant à l'humidité, insensible à la vermine et aux rongeurs, et quasiment incombustible. Cependant, son coût est supérieur à celui des autres isolants et de faible disponibilité malgré qu'il soit un matériau renouvelable (SCHITTICH 2003; ENCYCLOPEDIE).

La laine de mouton : c'est un isolant thermique de remplissage, considéré comme un bon régulateur hygrométrique qui présente une bonne absorption aux bruits aériens. Disponible en vrac ou en rouleaux, elle est facile et rapide à poser et difficilement inflammable. Son coût reste élevé au regard de cette matière première de proximité (SCHITTICH 2003).

La laine de coton : conçue à partir de coton naturel ou de vêtements usagés en coton, elle est considérée comme isolant écologique qui présente des qualités thermiques tout à fait intéressantes. Disponible en vrac, flocons, rouleaux ou panneaux. Elle est renouvelable et réutilisable. Toutefois, la culture du coton conventionnel reste polluante, car elle a généralement recourt aux pesticides. Son transport augmente encore son impact sur l'environnement (SCHITTICH 2003).

La laine de chanvre: c'est un isolant écologique, recyclable et inoffensif à notre santé. La bonne qualité de diffusion de l'air dans le chanvre assure une régularisation automatique de l'humidité sans déperditions de chaleur. Elle est naturellement répulsive aux insectes et sa texture dissuade les rongeurs, disponible sous forme de panneaux semi-rigides ou en rouleaux. a un bon déphasage thermique pour un confort d'été optimal. Mais a l'inconvénients d'être 4 fois plus cher que la laine de roche ou laine de verre (SCHITTICH 2003).

La cellulose : provient du papier recyclé, protégé par des additifs inoffensifs (ex : sel de bore) insensible à la moisissure, les insectes et le feu. Disponible sous forme de flocons en vrac, ou panneaux isolants semi-rigides. Par contre les particules issues du déchetage sont nocives à la santé. Aussi, elle est sujette au tassement avec le temps (SCHITTICH 2003).

Le bois : se présente sous différentes formes : laine de bois (panneau semi-rigide, en vrac...), panneau de fibres de bois rigides ou encore des fibraglos (fibres de bois avec enrobage de plâtre et ciment). Les déchets des scieries sont la matière première du panneau de bois. Performant au plan thermique, perméable à la diffusion de vapeur d'eau, sain et inoffensif à la santé, recyclable avec une longue durée de vie. Toutefois, son coût est élevé et il est assez sensible à l'humidité prolongée, car lorsqu'il est non traité, il peut rapidement se détériorer et on voit apparaître moisissures et champignons (SCHITTICH 2003; GUIDE).

Le lin: la fibre naturelle la plus résistante et légère qui isolait autrefois les maisons romaines. Aujourd'hui, l'utilisation du lin comme isolant se présente sous différentes formes suivant les applications : en vrac, en rouleaux, en panneaux semi-rigides, en panneaux plus rigides pour les cloisons, en feutre (acoustique) ou en paillettes (béton de lin). Par contre, le lin a une moins bonne résistance à l'humidité et il nécessite donc d'être accompagné d'un pare-vapeur¹⁷ (SCHITTICH 2003; GUIDE).

Isolants minéraux

Laine de verre et Laine de roche : La laine de verre est fabriquée au moyen de verre de récupération et de sable siliceux et obtenue par fusion de ces matières à environ 1500 °C. Disponible sous forme de rouleaux ou de panneaux, elle présente une bonne isolation thermique et acoustique en étant l'un des isolants les moins chers du marché. La fabrication de la laine de roche quant à elle nécessite des roches volcaniques comme le basalte. Disponible sous forme de rouleaux ou de panneaux, elle présente une bonne qualité d'isolation thermique et acoustique (meilleur isolant phonique que la laine de verre), et présente une bonne perméabilité à la vapeur d'eau. Par contre, la laine de verre et la laine de roche contiennent des fibres respirables très nocives pour la santé. Les rouleaux de laine se tassent dans le temps et peuvent perdre, au bout de quelques années,

¹⁷ Pare-vapeur: Est un type d'écran souple de protection constitué d'un film s'opposant à la migration de la vapeur d'eau, généralement appliqué sur les surfaces intérieures séparant un espace humide d'un espace où l'on souhaite éviter un phénomène de condensation

la moitié de leur épaisseur, aussi leurs performances thermiques sont fortement diminuées par l'humidité (SCHITTICH 2003; GUIDE).

Isolants synthétiques

Le polyuréthane : c'est une structure alvéolaire renfermant un gaz encore plus isolant que l'air. En panneaux, il est utilisé en isolation de chapes et en isolation extérieure. Il peut également s'utiliser sous la forme d'une mousse pour les joints de calfeutrement ou en manchons pour isoler les tuyaux. Par contre, sa longévité est faible, peut provoquer des irritations par contact, non recyclable et provoque aussi des gaz toxiques en cas d'incendie (PRASZEZYNK & PENOT 2010).

Le polystyrène : expansé ou extrudé, créé à partir de la transformation du pétrole brut, le polystyrène (sous forme de panneaux) est un isolant synthétique très apprécié pour sa bonne performance d'isolation thermique. Il reste l'un des matériaux isolants les plus utilisés dans la construction. Comme inconvénients, il est facilement dégradé par les rongeurs, il nécessite une importante énergie grise, ainsi qu'il est non renouvelable et non recyclable (THERMIQUE).

Les isolants, ont la capacité de participer par définition à la préservation de l'environnement grâce à leur effet réducteur de la consommation d'énergie. Certains isolants sont très bien adaptés pour le confort d'hiver (garder les calories dans le bâtiment) et à éviter pour le confort d'été (manque d'inertie). D'autres isolants sont sensibles à l'accumulation de la vapeur d'eau et peuvent se dégrader en accomplissant plus leur rôle d'isolation. Les isolants écologiques présentent un meilleur écobilan¹⁸, alors que les isolants minéraux ou synthétiques restent les isolants les plus utilisés. (MAZARI 2012; DURABLE 2015). Une étude préalable sur le climat est primordiale pour pouvoir choisir l'isolant adéquat pour un bâtiment.

5.2 Isolation transparente

L'isolation transparente associe l'utilisation contrôlée du rayonnement solaire par effet de serre à la limitation des déperditions thermiques. Les matériaux

¹⁸ Eco-bilan: Processus d'analyse des impacts environnementaux de la fabrication, utilisation et fin de vie d'un produit donné.

isolants transparents¹⁹ (TIM: Transparent insulation Materials) se distinguent par une résistance thermique élevée et une bonne transmission de la lumière (LIEBARD & DE HERDE 2006).

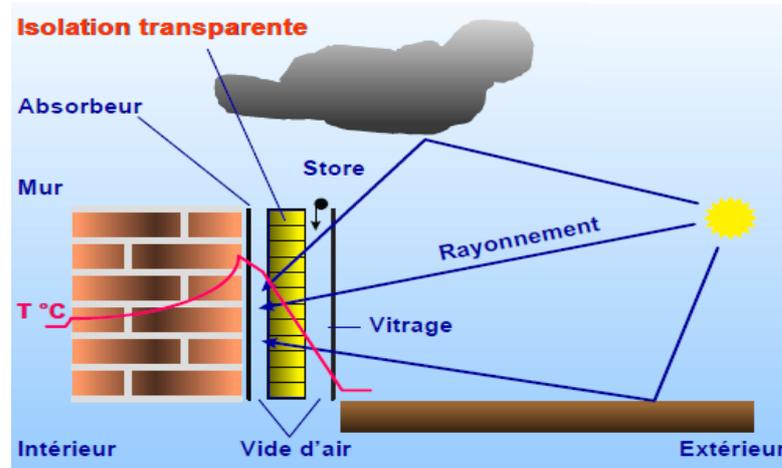


Figure I.13 Principe de fonctionnement de l'isolation transparente (LIEBARD & DE HERDE 2006)

Dans le cas d'une isolation transparente, le rayonnement solaire est transmis à travers l'isolant et absorbé par la surface noire (absorbeur) d'un mur opaque de brique ou de béton. La chaleur absorbée est restituée à l'intérieur du bâtiment à travers le mur, tandis que le flux de chaleur vers l'extérieur est limité par les caractéristiques thermiques du matériau isolant. En effet, l'absorbeur réémet la chaleur avec un certain déphasage à la pièce. Cela permet des économies d'énergie et de rendre positif le bilan effectif du mur (GONZALO & HABERMANN 2008). Les TIM peuvent effectivement être appliqués dans des systèmes de fenêtres. Ceux développés actuellement ne sont pas transparents, mais translucides²⁰. Ils laissent pénétrer la lumière de manière très diffuse, ce qui favorise l'éclairage naturel des pièces (LIEBARD & DE HERDE 2006).

¹⁹ Isolants transparents: C'est des isolants qui ont une résistance thermique élevée et une bonne transmission de la lumière

²⁰ Un objet est **transparent** s'il laisse totalement passer la lumière, sans la diffuser ni l'absorber (ou très peu), c'est à dire que l'on peut distinguer nettement un objet se trouvant de l'autre côté. Un objet est **translucide** s'il laisse partiellement passer la lumière sans pour autant permettre de distinguer nettement un objet se trouvant de l'autre côté.

En raison de son coefficient de conductivité thermique réduit, il est possible, avec une isolation sous vide, d'atteindre des coefficients U extrêmement faibles avec une quantité de matériau très faibles. L'âme de ce produit, développé récemment, est souvent de l'acide silicique microporeux - un très mauvais conducteur de chaleur - que l'on a enfermé dans une enveloppe en verre (GONZALO & HABERMANN 2008).

Le principal obstacle à l'utilisation accrue des isolants transparents réside en effet dans leur coût élevé dû en grande partie à leur couche de protection transparente et aux éléments de régulation comme les pare-soleil (GONZALO & HABERMANN 2008; LIEBARD & DE HERDE 2006).

L'isolation permet de limiter les déperditions thermiques à travers les parois, ce qui réduit la consommation énergétique pour le chauffage de la maison. En été, l'isolation empêche l'infiltration de l'air chaud extérieur. Diminuer de 1 °C la température ambiante d'une maison, correspond à environ 7 % de moins sur la facture énergétique. Aussi, une maison bien isolée vieillit mieux et nécessite moins de travaux d'entretien, associée à une ventilation efficace permettra de supprimer les risques d'humidité (FOURA 2007). Selon l'ADEME, les pertes de chaleur dans un bâtiment sont dues à 30% aux murs, 25% à la toiture, 30% aux fenêtres et 15% au sol du rez-de-chaussée. Bien isoler est devenue une nécessité, voire même une obligation. L'isolation thermique est triplement intéressante, en termes d'économies d'énergie, de protection de l'environnement, et de confort.

I.4 Conclusion

Pour toute architecture bioclimatique, il est important de considérer le climat du site en premier lieu afin d'adapter le bâtiment à son environnement. En effet, l'ensoleillement, l'humidité, la direction des vents...etc. constituent les éléments importants qui constituent la relation entre le climat et le bâtiment dans le but de procurer une sensation de confort à l'habitant. Lutter contre les déperditions thermiques en hiver et les infiltrations d'air chaud en été est le rôle des matériaux de construction. Le choix des matériaux est primordiale, favoriser les matériaux de construction locaux est l'un des principe de la

construction bioclimatique. L'isolation thermique et transparente est devenue une nécessité afin de réduire les besoins énergétiques, ce qui permettra d'économiser de l'énergie pour le chauffage en période de froid, le rafraîchissement en période de chaud ainsi que l'éclairage artificiel pendant tout l'année.

Le soleil est une source d'énergie inépuisable, choisir une architecture bioclimatique qui permettra de profiter de ses bienfaits pendant toute l'année, apparaît comme la meilleur solution pour économiser de l'énergie tout en préservant l'environnement en réduisant les émissions de gaz à effet de serre.

Dans le but d'essayer ce genre de solution en Algérie, une maison bioclimatique pilote a été construite au Nord d'Algérie. Dans le but d'étudier les performances énergétiques de ce projet pilote, différents outils de simulation seront présentés dans le chapitre suivant. Le choix de l'outil utilisé dans cette étude sera justifié, ainsi que les différentes équations et modèles utilisés seront présentés.

(AHMED ALI 2012)

AHMED ALI S., Performances thermique du matériau terre pour un habitat durable des régions arides et semi-arides: cas de Timimoune, Mémoire de magister, Faculté du génie de la construction, Université Mouloud Mammeri Tizi-Ouzou, 2012.

(ALMI 2010)

ALMI S., Une renaissance de l'architecture, Un urbanisme de régulation, Revue "Vies de Villes", N° 15, pp. 100-105, 2010.

(AL-OBAIDI & WOODS 2006)

AL-OBAIDI M.A.A.H., WOODS, P., Investigations on effect of the orientation on thermal comfort in terraced housing in Malaysia, International Journal of Low-Carbon Technologies, Vol. 1, N° 2, pp. 167-176, 2006.

(ANDERSSON et al. 1985)

ANDERSSON B., PLACE W., KAMMERUD R., SCOFIELD M.P., The impact of building orientation on residential heating and cooling, Energy and Buildings, Vol. 8, N°3, pp. 205-224, 1985.

(ASSAUT-VERT)

ASSAUT-VERT, Matériaux de construction,
URL: <http://assaut-vert.fr/spip.php?article34>

(BACHAR 2015)

BACHAR K., L'intégration des dimensions environnementale et sociale dans les pratiques urbaines en Algérie : Enjeux et Perspectives, Thèse de doctorat, Université Nantes Angers Le Mans, 2015.

(BEKKOUCHE et al. 2013)

BEKKOUCHE S.M.A., BENOUAZ T., CHERIER M.K., HAMDANI M., YAICHE R.M., KHANNICHE R., Influence of building orientation on internal temperature in Saharan climates-building located in Ghardaïa region (Algeria). *Thermal Science*, volume 17, N°2, pp. 349-364, 2013.

(BENSALEM 2013)

BENSALEM S., La conception bioclimatique des bâtiments, Portail Algérien des Energies Renouvelables, 2013.

(BERGHOUT 2012)

BERGHOUT B., Effet de l'implantation d'un bâtiment collectif sur le confort hygrothermique intérieur: cas de Biskra (Algérie), Mémoire présenté comme exigence partielle à l'obtention de la maîtrise en génie de la construction, Ecole de Technologie Supérieure, Université du Québec, 2012.

(BIOCLIMATISME)

Cours des principes du bioclimatisme, article disponible en ligne.

URL: <http://architecte-rc.com/page-architecte,Principe,28.html>

(BOCQUET 2013)

BOCQUET H., Fiche technique-la laine de coton, Conseil d'Architecture d'Urbanisme et de l'Environnement de l'Allier "CAUE-Allier", 2013, article disponible en ligne.

URL: <http://www.caue03.com/>

(CELLULOSE)

Isolant naturel : la cellulose-Fiche technique, article disponible en ligne.

URL: <http://www.ecohabitation.com>

(CHESNE 2012)

CHESNE L., Vers une nouvelle méthodologie de conception des bâtiments basée sur leurs performances bioclimatiques, Thèse de Doctorat, Institut National des Sciences Appliquées, Lyon, 2012.

(CHEVILLOTTE)

CHEVILLOTTE P., Architecte d'intérieur, Organisation des espaces et des volumes architecturaux.

URL:<http://www.architecte-interieur-lyon.com/conception-architecture-originale-mesure/organisation-espace-plan.htm>

(COSTIC 2011)

Comité Scientifique et Technique des Industries Climatiques COSTIC,
Guide technique- Les Bâtiments À Basse Énergie, ADEME, 2011.

(COURGEY & OLIVA 2006)

COURGEY S., OLIVA J.P., La conception bioclimatique -Des maisons
économiques et confortables en neuf et en réhabilitation, Edition Terre
vivante, 2006.

(DICTIONNAIRE-ENVIRONNEMENT)

URL:

http://www.actu-environnement.com/ae/dictionnaire_environnement/definition.php4

(DURABLE 2015)

Guide de l'habitat durable-Annuaire des artisans de l'éco-construction et
de l'éco-rénovation, Chambre de Métiers et de l'Artisanat des Yvelines,
Edition 2015.

(ECOREA 2010)

ECOREA construction, "Principes de la construction Bioclimatique", 2010.

URL: *<http://ecorea.fr/construction-bioclimatique.php>*

(ENCYCLOPEDIE)

Isolants naturels, consoglobe: l'encyclopédie du développement durable,
article disponible en ligne.

URL: *http://www.encyclo-ecolo.com/Isolants_naturels*

(FERNANDEZ & LAVIGNE 2009)

FERNANDEZ P., LAVIGNE P., Concevoir des bâtiments bioclimatiques:
fondements & méthodes, Edition Le moniteur (Paris), 2009.

(FOURA 2007)

FOURA S., Simulation des paramètres du confort thermique d'hiver en
Algérie, thèse de Doctorat, Faculté des sciences de la terre, de la
géographie et de l'aménagement du territoire, Université Mentouri,
Constantine, 2007.

(GERBER 1994)

GERBER A., Le Corbusier et le mirage de l'Orient. L'influence supposée de l'Algérie sur son œuvre architecturale, *Revue du monde musulman et de la Méditerranée*, pp. 363-378, n° 73-74, 1994.

(GONZALO & HABERMANN 2008)

Gonzalo R., Habermann K. J., *Architecture et efficacité énergétique: Principes de conception et de construction*, Edition Walter de Gruyter, 2008.

(GRATIA & DE HERDE 2006)

GRATIA E., DE HERDE A., *Thermique des immeubles de bureaux*, Presses universitaires de Louvain, Belgique, 2006.

(GUIDE)

Guide isolation thermique, une maison plus hermétique, c'est logique!, article disponible en ligne.

URL: <http://www.centre.ademe.fr>

(GUIDE 2006)

Guide de l'éco construction, Document édité par l'Agence Régionale de l'Environnement en Lorraine, l'ADEME et l'Agence de l'eau Rhin-Meuse, 2006. Article disponible en ligne.

URL: <http://www.grenoble.archi.fr/cours-en-ligne>

(GUIDE-PRATIQUE 2010)

Assurer une bonne protection solaire, guide pratique pour la construction et la rénovation durables de petits bâtiments, Juillet 2010. Article disponible en ligne.

URL: app.bruxellesenvironnement.be/guide_batiment_durable/docs/ENE13_FR.pdf

(HAJ-HUSSEIN 2012)

HAJ-HUSSEIN M., *Investigation sur la qualité des ambiances hygrothermiques et lumineuses des habitats palestiniens: la cour: contribution environnementale et socioculturelle*, Thèse de Doctorat, Université de Bordeaux 1, 2012.

(HYDE 2008)

Hyde R. Bioclimatic Housing Innovative Designs For Warm Climates, Edition Earthscan, London, 2008.

(ISOLER 2016)

Isoler son logement, La transition énergétique pour la croissance verte, ADEME, 2016.

(ISOLIEGE)

Isoliege, L'isolation parfaite pour tout système, article disponible en ligne.

URL: www.ecobati.be

(IZARD & GUYOT 1979)

IZARD J.L., GUYOT A., Archi-bio, Edition Parenthèses, 1979.

(KORANTENG & ABAITEY 2010)

KORANTENG C., ABAITEY E.G., The effects of form and orientation on energy performance of residential buildings in Ghana, Journal of Science and Technology (Ghana), Vol. 30, N°1, pp. 71-81, 2010.

(LAINE)

Isolation de laine-c'est notre nature, article disponible en ligne.

URL: www.ecobati.be

(LIEBARD & DE HERDE 2006)

LIEBARD A., DE HERDE A., Traité d'architecture et d'urbanisme bioclimatique, Edition Le moniteur, Paris, 2006.

(LIN)

Laine de Lin, Fiche technique sur les matériaux isolants, article disponible en ligne.

URL: <http://www.crma-limousin.fr>

(Linternaute 2013)

Quels matériaux pour isoler votre habitat?, article disponible en ligne.

URL : <http://www.linternaute.com>

(MAZARI 2012)

MAZARI M., Etude et évaluation du confort thermique des bâtiments à caractère public : cas du département d'architecture de Tamda (Tizi-

Ouzou), Mémoire de magistère, Faculté de Génie de la construction, Université de Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou, 2012.

(MAZRIA 2005)

MAZRIA E., Le guide de la maison solaire, Editions Parenthèses, 2005

(MISSOUM 2011)

MISSOUM M., Contribution de l'énergie photovoltaïque dans la performance énergétique de l'habitat à haute qualité énergétique en Algérie, Mémoire de magistère, Faculté de Technologie, Université de Hassiba Benbouali de Chlef, 2011.

(MOLLE & PATRY 2013)

MOLLE D., PATRY P.M., RT 2012 et RT existant-Réglementation thermique et efficacité énergétique, Edition Eyrolles, 2^e édition 2013.

(NAJI 2015)

NAJI M.E., Réalisation d'un éco-quartier, Mémoire de magistère, Faculté des Sciences Exactes et Appliquées, Université d'Oran, 2015.

(OLGAY 1963)

OLGYAY V., Design with Climate: Bioclimatic Approach to Architectural Regionalism. New and expanded edition, 1963.

(OLGAY & OLGAY 1963)

OLGAY V., OLGAY A., Design with climate, Bioclimatic Approach to Architectural Regionalism, New Jersey, 1963.

(OULEBSIR 2004)

OULEBSIR N., Les usages du patrimoine: monuments, musées et politique coloniale en Algérie 1830-1930, Les Editions de la MSH, 2004.

(PORRITT et al. 2010)

PORRITT S., SHAO L., CROPPER P.C., GOODIER C.I., Building orientation and occupancy patterns and their effect on interventions to reduce overheating in dwellings during heat waves, IN: Energy and Sustainable Development: Proceedings of the First IESD PhD Conference. Université Leicester: De Montfort, 2010.

(PRASZEZYNK & PENOT 2010)

PRASZEZYNK L., L'isolation des pavillons, article disponible en ligne.

URL: <http://blogpeda.ac-poitiers.fr/technologie>

(RTE)

Réglementation Thermique et Energétique des bâtiments neufs en Tunisie-
Guide pratique de conception de logements économes en énergies.

URL: <http://www.enerbat.nat.tn/site/download/guide.pdf>

(SALOMON 2000)

SALOMON T., Architecture solaire et conception climatique des bâtiments
(pdf), L'Agence Méditerranéenne de l'Environnement (AME) et l'Ordre
des Architectes, Montpellier, 2000.

(SCHITTICH 2003)

SCHITTICH C., Architecture solaire : Stratégies Visions Concepts, Edition
Birkhäuser, 2003.

(SZOKOLAY 2008)

SZOKOLAY S.V., Introduction to Architectural Science: The Basis of
Sustainable Design, Edition Elsevier : Architectural Press, London, 2008.

(THERMIQUE)

Comparatif des matériaux isolants, Conseils thermiques, Article
disponible en ligne.

URL: http://conseils-thermiques.org/contenu/comparatif_isolants.php

(TIXIER 2012)

TIXIER N., Ambiances thermiques-Stratégies thermiques pour la
conception, Ecole Nationale Supérieure d'Architecture de Grenoble (Cours
en ligne), 2012.

(VALCEA 1986)

VALCEA E.D., Isolation thermique des constructions en Algérie, Edition
Entreprise nationale du livre, Alger, Vol. 998, pp. 81, 1986.

(VERRE)

Propriétés et fonctions du verre, Le verre et le rayonnement solaire, article
disponible en ligne.

URL:http://fr.saint-gobain-glass.com.im-extra-web2-natpub.sgg.lbn.fr/sites/fr.saint-gobain-glass.com.im-extra-web2-natpub.sgg.lbn.fr/files/386_verre_et_rayonnement.pdf

Chapitre II

Modélisation

II.1 Introduction

La question de l'évaluation des performances énergétiques et environnementales des bâtiments a mené à la réalisation d'un grand nombre d'outils de calculs, qui se répartissent schématiquement selon deux familles : les outils d'analyse de cycle de vie et les outils de simulation énergétique. Certains outils plus vastes, de types progiciels, intègrent une multitude de problématiques comprenant entre-autres, l'énergie et les impacts environnementaux (THIERS 2008).

II.2 Outils de simulation

II.2.1 Les outils d'analyse de cycle de vie

Selon (ANALYSE-MANAGEMENT) une meilleure prise en compte des problématiques environnementales passe par une connaissance de plus en plus fine des impacts sur l'environnement et la santé humaine liés à la composition, la fabrication, l'utilisation et la fin de vie des produits. Initialement développée pour les produits industriels, la méthode d'Analyse de Cycle de Vie (A.C.V.) est aujourd'hui utilisée dans le secteur de la construction. L'étude réalisée par l'AIE (Agence Internationale de l'Energie) dans le cadre du programme ECBCS (Energy Conservation in Building and Community Systems) a comptabilisé plus d'une vingtaine d'outils d'analyse de cycle de vie dédiés spécifiquement au bâtiment (EQUER, BEES, TEAM, ECOPR, EcoQuantum, ELODIE et Athena Environmental Impact Estimator). Le principe de fonctionnement de ces différents outils reste assez similaire. Les données concernant le bâtiment, ses matériaux constitutifs, et son utilisation sont saisies ou partiellement fournies par un logiciel d'analyse énergétique. Ensuite, à partir d'une base de données d'inventaire, le logiciel calcule les impacts environnementaux engendrés sur l'ensemble du cycle de vie du bâtiment. Ces résultats concernent généralement une dizaine de catégories d'impacts (réchauffement global, pollutions, génération de déchets, etc.) présentés sous forme graphique (COLOMBERT et *al.* 2011; THIERS 2008).

II.2.2 Les outils de simulation énergétique

Les besoins en termes d'environnement de simulation changent en fonction de l'état d'avancement d'un projet, ce qui explique la grande diversité des outils qui existent pour simuler le comportement énergétique des bâtiments. Il faut en effet disposer d'outils simples pour pouvoir faire rapidement, dès la phase d'esquisse, des choix judicieux qui sont primordiaux pour ne pas aboutir à une proposition qu'il sera par la suite difficile de rendre performante. Dans une phase un peu plus avancée, au niveau de l'avant projet, l'outil de simulation doit permettre d'optimiser l'enveloppe du bâtiment pour réduire ses besoins de chauffage et de rafraîchissement. Par la suite, on doit être capable de donner une estimation des consommations du bâtiment, de dimensionner leurs systèmes etc. On utilise alors des outils pour lesquels un plus grand nombre d'entrées est nécessaire et qui sont donc plus longs à prendre en main mais qui permettent de connaître avec précision le comportement dynamique du bâtiment sur le plan énergétique. Donc Les outils de simulation énergétiques permettent de calculer l'ensemble des besoins énergétiques (TITTELEIN 2008). La plupart des outils de simulation énergétiques du bâtiment qui sont utilisés aujourd'hui ont été répertoriés et décrits par le bureau de l'efficacité énergétique et de l'énergie renouvelable aux Etats-Unis d'Amérique (EERE : Energy Efficiency and Renewable Energy). Deux types se distinguent par leur niveau de complexité (THIERS 2008; TITTELEIN 2008):

II.2.2.1 Les outils de simulation simplifiés

Ces outils s'appuient sur une description sommaire du bâtiment et sur des bilans énergétiques annuels ou mensuels. Ceux-ci sont destinés par exemple au dimensionnement de certains équipements ou à la vérification du respect des réglementations. C'est le cas de la méthode de 3CL-DPE utilisée en France pour l'établissement des diagnostics de performance énergétique (DPE), et PHPP (pour « Passive House Planning Package ») utilisé en Allemagne pour la conception et la certification des bâtiments basse consommation. Ces outils permettent d'obtenir rapidement des tendances sur le comportement thermique du bâtiment et ne peuvent évaluer ses consommations que par des règles

simples et statiques (pas de simulation dynamique des systèmes), ce qui les ramène à ignorer certains nombre de phénomènes tels que la variation horaire de divers paramètres (consignes de température, gains solaires, apports internes) ou la description précise de l'enveloppe du logement.

II.2.2.2 Les outils de simulation dynamique

À partir de la description du bâtiment (surface, orientation, volumes...etc.), des charges internes (nombre d'occupants, appareils électroménagers...etc.), de ses équipements (systèmes de chauffages, ventilation et climatisation) et de scénarios de fonctionnement, ces logiciels réalisent le calcul de différentes températures, des besoins de chauffage, de rafraichissement et de la consommation énergétique totale du bâtiment. Le bâtiment y est traité de manière multi-zonale. Les principaux outils de simulation dynamique du bâtiments sont ESP-r, CoDyBa, EnergyPlus, SPARK, TAS, COMFIE et TRNSYS. Parmi l'ensemble des outils identifiés précédemment, la réalisation de ce travail de thèse nécessite l'outil le plus adapté à ses objectifs. En particulier, il devrait permettre la modélisation d'une maison bioclimatique et de son système de chauffage solaire, d'une part, et pouvoir calculer les différents paramètres des performances énergétiques de la maison. Notre choix s'est porté sur le logiciel TRNSYS pour l'évaluation des performances énergétiques de la maison, et par manque de données sur l'étape de la construction de la maison nécessaires à l'analyse du cycle de vie, n a choisit une simple analyse du taux d'émission de CO₂ comme méthode pour l'évaluation des performances environnementales.

II.3 Présentation du logiciel TRNSYS

TRNSYS « TRaNsient SYstem Simulation program » est développé depuis 1975 en collaboration de l'université de Wisconsin (Madison), une entreprise privée de la même ville (TESS), le groupe TransSolar en Allemagne et le CSTB (Centre Scientifique et Technique du Bâtiment) en France. Ce logiciel permet d'intégrer toutes les caractéristiques du bâti (emplacement, matériaux de construction utilisés, architecture globale...) mais aussi des systèmes de chauffage ou de climatisation afin de réaliser des simulations thermiques dynamiques.

Estimations de consommations d'énergie, confort thermique, hygrométrie, etc. sont autant d'éléments considérés. C'est un outil de simulation en régime dynamique multi zones, structuré de manière modulaire, ce qui assure au programme une grande flexibilité et facilité par l'insertion des sous-programmes développés sous Fortran.

La bibliothèque de modèles disponibles est très importante et toujours en cours de développement. Chaque modèle possède sa propre méthode de résolution ce qui fait la force de ce logiciel. Une interface graphique performante (IISIBAT « pour Interface Intelligente de Simulation des BATiments ») permet de visualiser tous les composants d'un système, de réaliser la construction de la simulation et la saisie des données (TITTELEIN 2008; TRNSYS-MODELISATION). Il est l'un des logiciels les plus connus et largement utilisés dans la simulation thermique du bâtiment (MONSEN *et al.* 1981; BRAUN 1990; MEI *et al.* 2003; ARKAR *et al.* 2007; MARSHALL *et al.* 2012; VOLLARO *et al.* 2015; LIN *et al.* 2016)

Ce logiciel informatique, se caractérise par ses trois fonctions qui se résument comme suit :

- Les entrées (inputs): elles concernent toutes les informations à introduire et à stocker selon l'ergonomie du logiciel dans des bibliothèques que le concepteur peut utiliser. Ces entrées englobent l'environnement physique (climat, site), le bâtiment (l'enveloppe), les apports internes (occupants...) et les équipements (Chauffage, Ventilation et Climatisation...)
- Le traitement des données : se fait en fonction d'un modèle de représentation du bâtiment et la demande de l'utilisateur.
- Les sorties (outputs): sont les ensembles des résultats qui peuvent être fournis par le logiciel à l'issue d'une exécution

II.3.1 Description du modèle de simulation avec le logiciel TRNSYS

Une maison d'habitation individuelle couplée avec un système de chauffage solaire est modélisée dans cette étude (figure II.1). Le système de chauffage solaire comprend un capteur plan relié au réservoir de stockage thermique entièrement mélangé, pour l'eau chaude sanitaire (ECS). Le système de

chauffage solaire est couplé avec la maison par un chauffage par le sol. Les équations de base sur lesquelles repose le logiciel TRNSYS seront présentées selon chaque modèle au fur et à mesure que l'on présente la maison multizones considérée avec ses systèmes de chauffage et rafraîchissement.

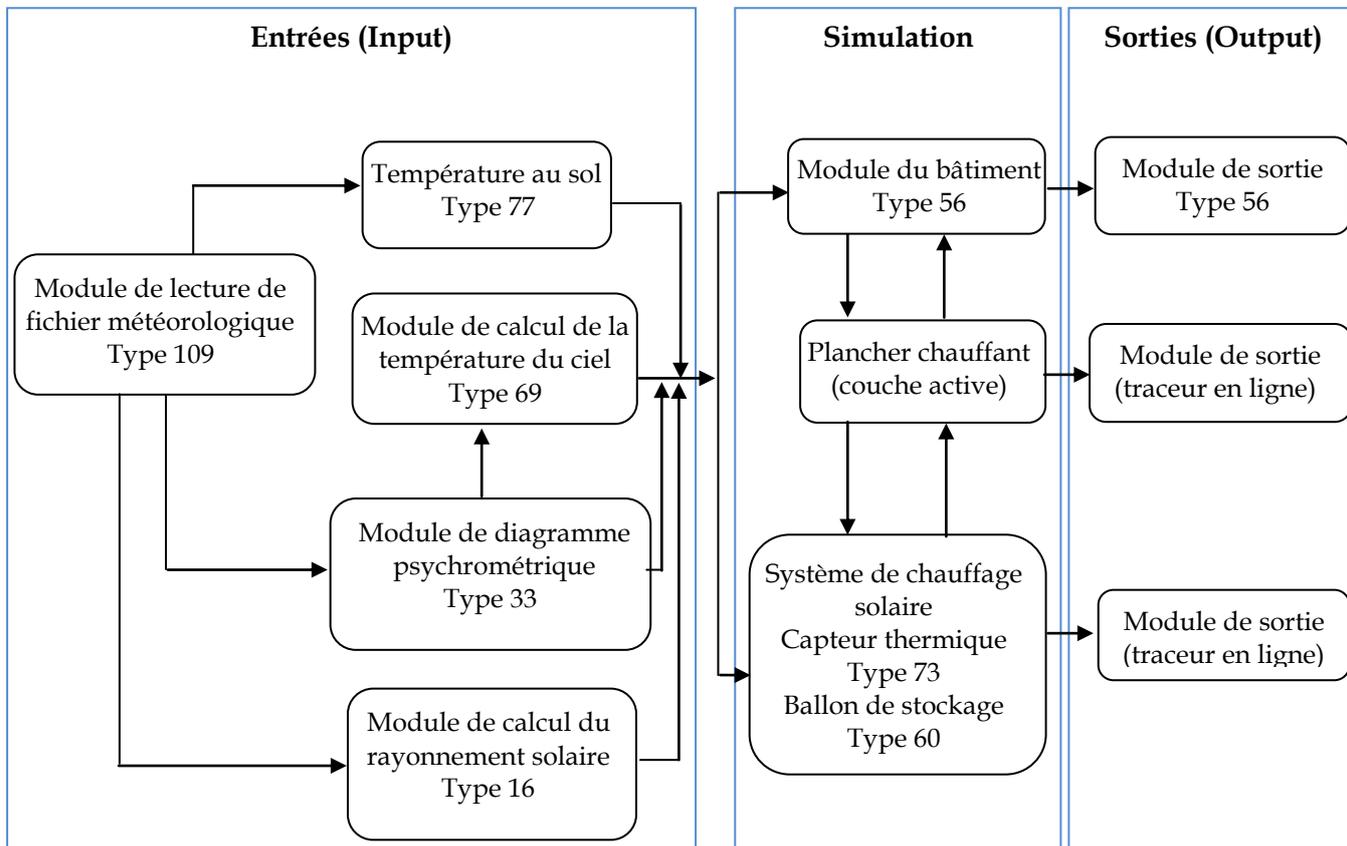


Figure II.1 Processus de simulation par TRNSYS

II.3.1.1 Modèle de la maison

La maison, avec un système de chauffage solaire, est simulée en utilisant le code de TRNSYS (KLEIN et *al.* 2004) comme un bâtiment multizone (Type 56) ayant un plancher radiant défini comme une couche active du plancher entre le niveau du sol et sous-sol. Comme le montre la figure II.2, les caractéristiques de la maison (orientation, caractéristiques thermiques des composants, etc.), l'infiltration d'air et les gains thermiques internes sont les principales entrées du type 56.

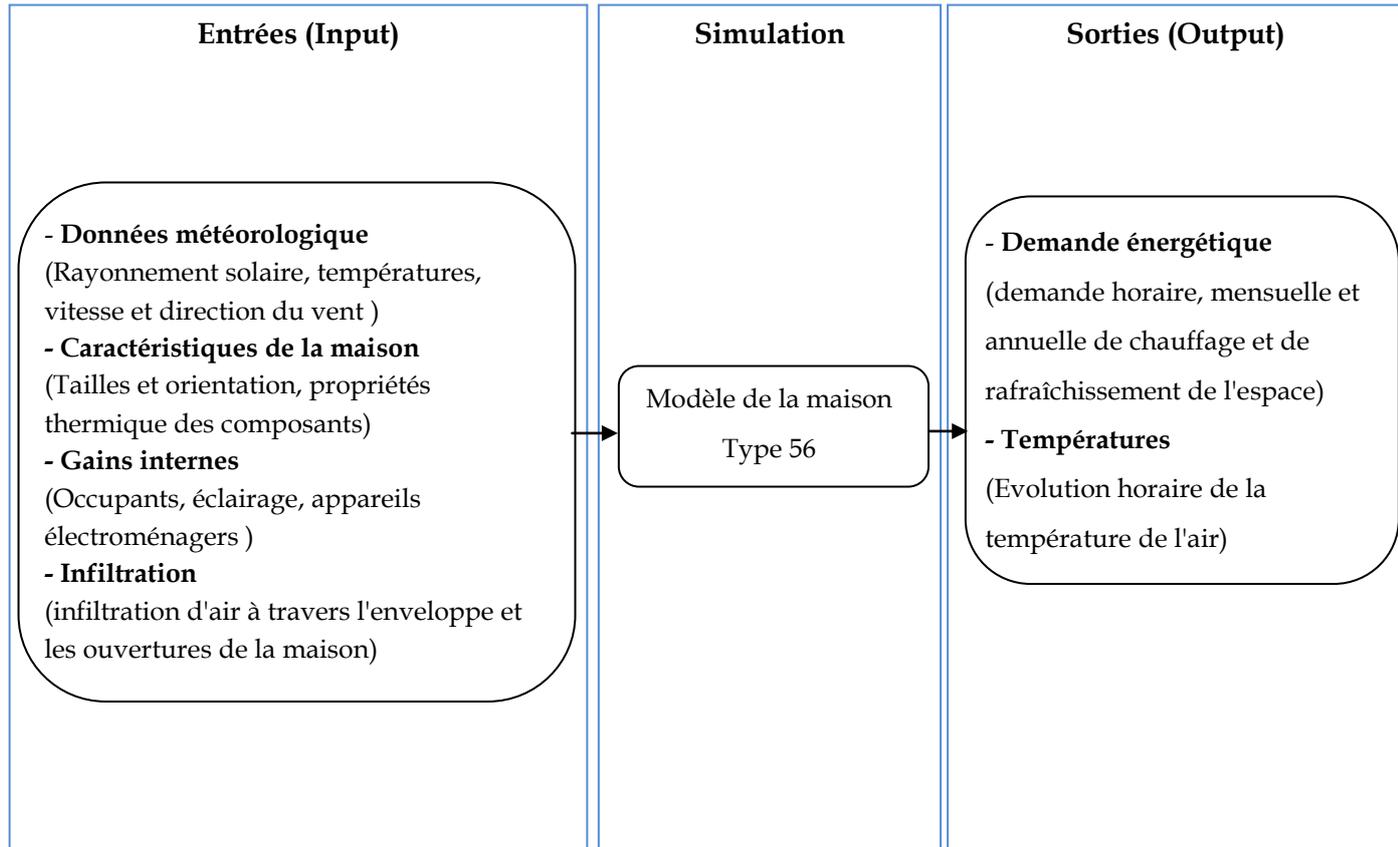


Figure II.2 Entrées et sorties du modèle de la maison

En considérant que le taux de variation de l'énergie interne pour la zone thermique est égal au gain de chaleur net, le bilan énergétique global peut être illustré comme suit:

$$\dot{Q}_T = \dot{Q}_{surf} + \dot{Q}_{inf} + \dot{Q}_{vent} + \dot{Q}_{gain} + \dot{Q}_{cplg} \quad (II.1)$$

avec:

$$Q_{surf} = h_c \rho_a c_a (T_{s,i} - T_i) \quad (II.2)$$

$$Q_{inf} = \dot{m}_{inf} \rho_a c_a (T_o - T_i) \quad (II.3)$$

$$Q_{gain} = h_c \rho_a c_a (T_s - T_i) \quad (II.4)$$

$$Q_{cplg} = \dot{m}_{j \rightarrow i} \rho_a c_a (T_{zone,i} - T_i) \quad (II.5)$$

Dans notre cas, comme la maison est naturellement ventilée, les gains par ventilation du système CVC (\dot{Q}_{vent}) sont nuls.

A noter que l'infiltration affecte la charge de climatisation, et la température de l'air intérieur dans la maison. En général, le taux d'infiltration est calculé par la

loi de puissance qui établie une relation entre la chute de pression (ΔP) et le débit volumique (Q) arrivant par les ouvertures, selon la relation suivante:

$$Q = \Delta P^n \quad (\text{II.6})$$

La littérature indique que la valeur de l'exposant n doit être comprise entre 0,5 et 1. Il convient de noter que de grandes ouvertures sont caractérisées par des valeurs très proches de 0,5, tandis que les valeurs proches de 0,65 caractérisent les petites ouvertures sous forme de fissures (SADINENI et al. 2011).

II.3.1.2 Modèle du capteur thermique

Une plaque plane de Type 73 représente le modèle de capteur solaire théorique adopté pour modéliser les performances des capteurs solaires. Les principaux paramètres d'entrée et de sortie du capteur solaire thermique sont illustrés dans la figure II.3.

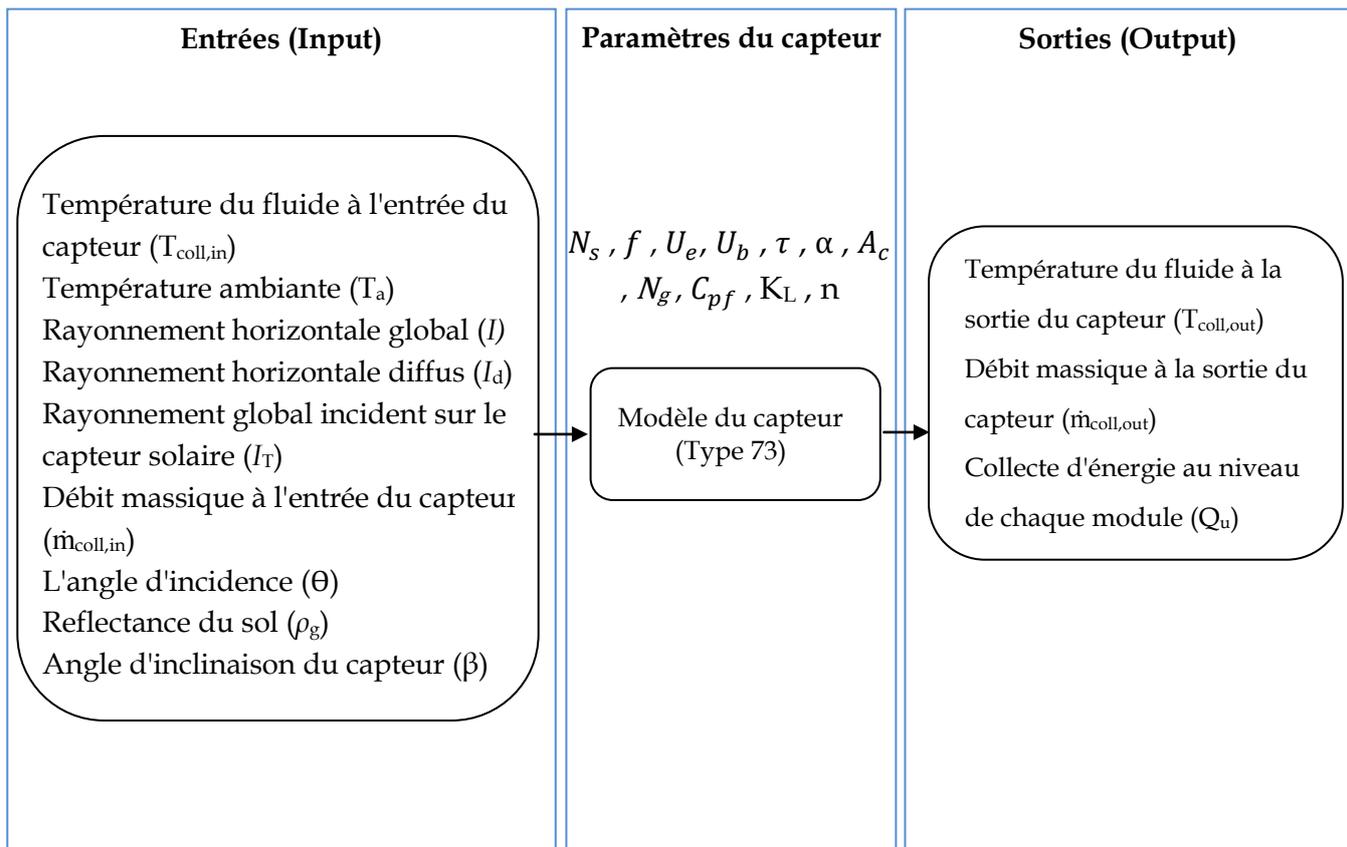


Figure II.3 Entrées et sorties du capteur thermique

Les performances thermiques du champ de capteurs sont déterminées par le nombre de modules en série et les caractéristiques de chaque module. La collecte d'énergie de chaque module dans un réseau de modules N_s (en série)

est modélisée selon l'équation Hottel-Whillier suivante (DUFFIE & BECKMAN 1980):

$$Q_u = \frac{A_c}{N_s} \sum_{j=1}^{N_s} F_{R,j} [I_T(\tau\alpha) - U_{L,j}(T_{i,j} - T_a)] \quad (\text{II.7})$$

$$F_{R,j} = \frac{N_s \dot{m}_f C_{pf}}{A_c N_{L,j}} \left(1 - \exp\left(-\frac{f U_{L,j} A_c}{N_s \dot{m}_f C_{pf}}\right) \right) \quad (\text{II.8})$$

II.3.1.3 Modèle du réservoir de stockage

Le réservoir de stockage entièrement mélangé, avec des échangeurs de chaleur en serpentin immergés, est modélisé par le type 60 de la bibliothèque TRNSYS standard.

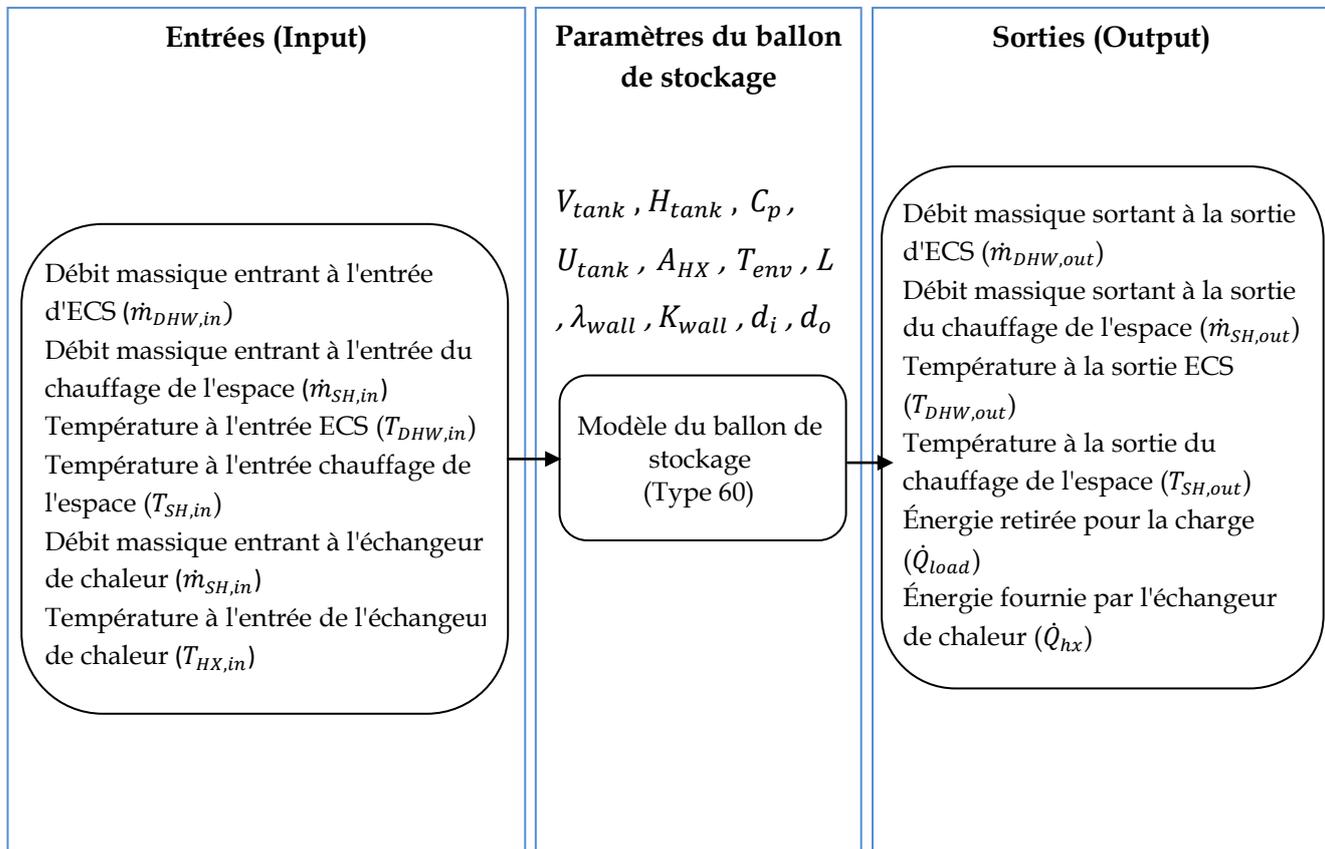


Figure II.4 Entrées et sorties du ballon de stockage

Le bilan énergétique de la cuve de stockage entièrement mélangé s'exprime comme suit :

$$\dot{Q}_{acum} = \dot{Q}_{hx} - \dot{Q}_{load} - \dot{Q}_{loss} \quad (\text{II.9})$$

avec:

$$\dot{Q}_{acum} = \rho C_p V_{tank} \frac{T_{tank-n} - T_{tank}}{\Delta t} \quad (\text{II.10})$$

$$\dot{Q}_{HX} = UA_{HX} \times (LMDT) \quad (II.11)$$

$$\dot{Q}_{load} = \dot{m}_{DHW}C_p(T_{DHW,in} - T_{DHW,out}) + \dot{m}_{SH}C_p(T_{SH,in} - T_{SH,out}) \quad (II.12)$$

$$\dot{Q}_{loss} = (U_{tank} + \Delta U) \times A_{tank} \times (T_{env} - T_{tank}) \quad (II.13)$$

En remplaçant chaque terme de l'équation (II.9), la variation de la température du réservoir de stockage selon un pas de temps est donnée par:

$$T_{tank-n} = T_{tank} + \dot{m}_{DHW}C_p(T_{DHW,in} - T_{DHW,out}) + \dot{m}_{SH}C_p(T_{SH,in} - T_{SH,out}) + UA_{HX} \times (LMDT) + (U_{tank} + \Delta U) \times A_{tank} \times (T_{env} - T_{tank}) \quad (II.14)$$

La modélisation d'une maison multizones, ainsi que son système de chauffage composé d'un capteur thermique relié à un ballon de stockage pour l'eau chaude sanitaire et à un plancher chauffant permettant le chauffage de la maison, permet d'avoir un aperçu maison avec système de chauffage solaire dans le studio TRNSYS (figure II.5).

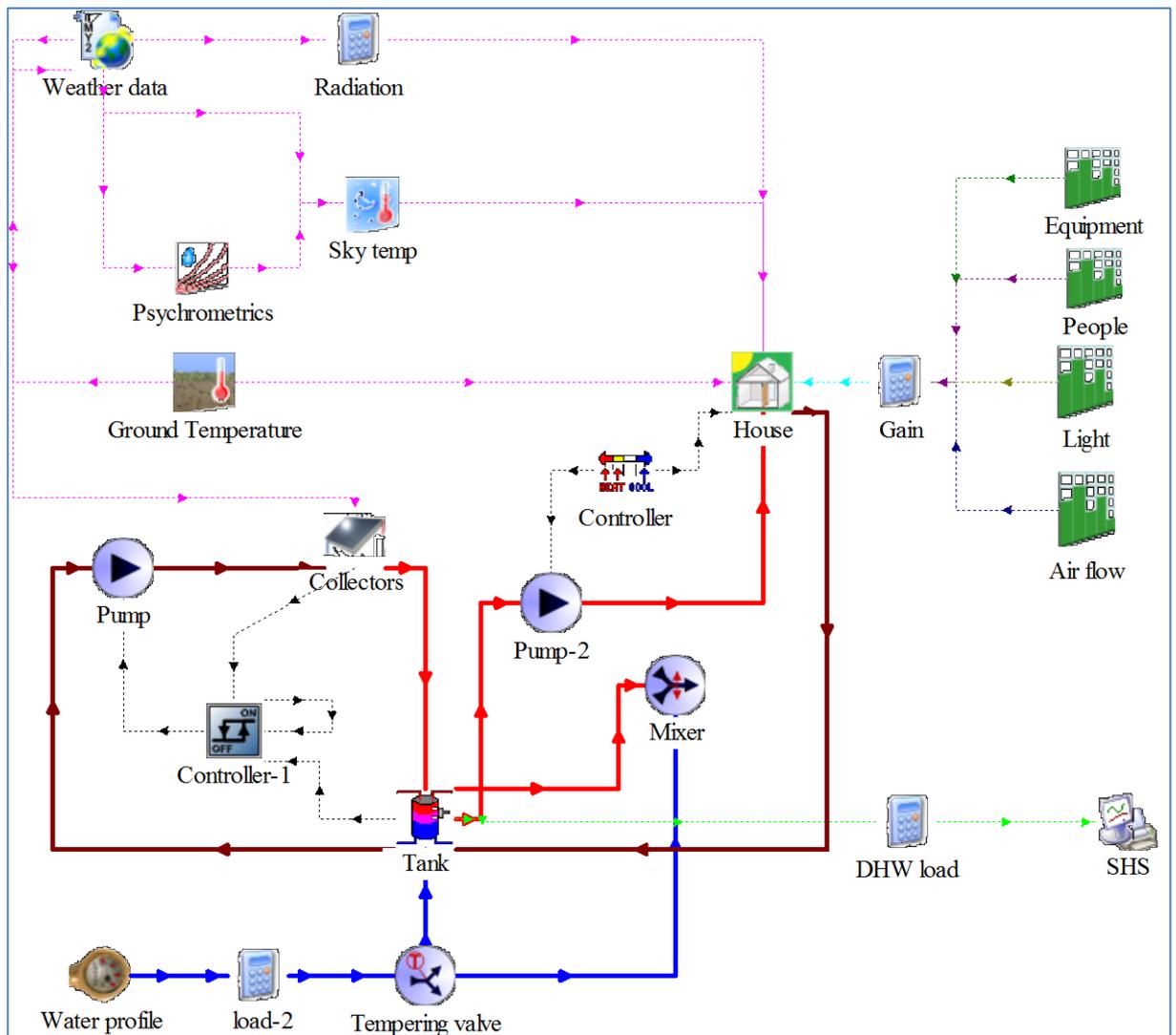


Figure II.5 Aperçu d'une maison avec système de chauffage solaire dans le studio TRNSYS

II.4 Conclusion

Dans ce chapitre un modèle dynamique d'une maison multizone couplée à un système de chauffage solaire sous le logiciel TRNSYS a été présenté. Nous avons commencé par une description mathématique d'une maison multizone intégrant un système de chauffage au sol. Ensuite, on a modélisé un capteur plat et un réservoir de stockage, ainsi qu'un modèle TRNSYS du système de chauffage solaire. Le système de chauffage est couplé à la construction à travers le système de plancher chauffant. Le modèle développé dans ce chapitre sera

utilisé dans le chapitre suivant pour l'évaluation des performances énergétique d'une maison bioclimatique pilote.

(ARKAR *et al.* 2007)

ARKAR C., VIDRIH B., MEDVED S., Efficiency of free cooling using latent heat storage integrated into the ventilation system of a low energy building. *International Journal of Refrigeration*, Vol. 30, N° 1, pp. 134-143, 2007.

(BRAUN 1990)

BRAUN J. E., Reducing energy costs and peak electrical demand through optimal control of building thermal storage, *ASHRAE transactions*, Vol. 96, N° 2, pp. 876-888, 1990.

(COLOMBERT *et al.* 2011)

COLOMBERT M., PEUPORTIER B., de CHASTENET C., DIAB Y., Gobin C, HERFRAY G, JARRIN T, TARDIEU C., TROCME M., Analyse de cycle de vie à l'échelle du quartier : un outil d'aide à la décision ? Le cas de la ZAC Claude Bernard à Paris (France), *Environnement Urbain/ Urban Environment*, Vol. 5, pp. c1-c21, 2011.

(THIERS 2008)

THIERS S., Bilans énergétiques et environnementaux de bâtiments à énergie positive, Thèse de doctorat, Ecole des Mines de Paris, 2008.

(DUFFIE & BECKMAN 1980)

DUFFIE J.A, BECKMAN W.A., *Solar engineering of thermal processes*, Wiley, New York, 1980.

(KLEIN *et al.* 2004)

KLEIN S.A., BECKMAN W.A., MITCHELL J.W., DUFFIE J.A., FREEMAN T.L., *et al.*, TRNSYS 16–A Transient system simulation program, user manual, Solar Energy Laboratory, Université de Wisconsin-Madison, 2004.

(LIN *et al.* 2016)

LIN Y. H., TSAI K. T., LIN M. D., YANG M. D. (2016). Design optimization of office building envelope configurations for energy conservation, *Applied Energy*, VOL. 171, pp. 336-346, 2016.

(MARSHALL *et al.* 2012)

MARSHALL L., Numerical simulation of underground Seasonal Solar Thermal Energy Storage (SSTES) for a single family dwelling using TRNSYS, *Solar Energy*, Vol. 86, pp. 289-300, 2012.

(MEI *et al.* 2003)

Mei L., Infield D., Eicker U., Fux V., Thermal modelling of a building with an integrated ventilated PV façade, *Energy and buildings*, Vol. 35, N°6, pp. 605-617, 2003.

(MONSEN *et al.* 1981)

MONSEN W. A., KLEIN S. A., BECKMAN W. A., Prediction of direct gain solar heating system performance, *Solar Energy*, Vol. 27, N° 2, pp. 143-147, 1981.

(SADINENI *et al.* 2011)

SADINENI S.B., MADALA S., BOEHM R.F., Passive building energy savings: a review of building envelope components, *Renew Sustain Energy Rev*, Vol. 15, pp. 3617-3631, 2011.

(THIERS 2008)

THIERS S., Bilans énergétiques et environnementaux de bâtiments à énergie positive, Thèse de doctorat, Ecole des Mines de Paris, 2008.

(TITTELEIN 2008)

TITTELEIN P., Environnements de simulation adaptés à l'étude du comportement énergétique des bâtiments basse consommation, thèse de doctorat, Sciences de l'ingénierie, Université de Savoie, 2008.

(TRNSYS-MODELISATION)

TRNSYS - une percée dans la modélisation thermique de bâtiments, CSTB le futur en construction.

URL: <http://www.cstb.fr/archives/webzines/editions/edition-du-14-decembre-2010/trnsys-17-une-percee-dans-la-modelisation-thermique-de-batiments.html>

(VOLLARO *et al.* 2015)

VOLLARO R. D. L., GUATTARI C., EVANGELISTI L., BATTISTA G.,
CARNIELO E., GORI P., Building energy performance analysis: A case
study, *Energy and Buildings*, Vol. 87, pp. 87-94, 2015.

Chapitre III

Evaluation des performances énergétiques et environnementales d'une habitation bioclimatique dans le Nord de l'Algérie

III.1 Introduction

Aujourd'hui, au niveau national et international, les bâtiments sont l'un des plus gros consommateurs d'énergie; cela est dû notamment à la croissance de la population et de la planification urbaine. En outre, les statistiques récentes indiquent qu'en Algérie le secteur résidentiel est responsable de plus de 40% de la consommation finale d'énergie (MISSOUM et *al.* 2014; GONG et *al.* 2012; CHESNE et *al.* 2012). Cela implique que le secteur de la construction représente un grand potentiel d'économies d'énergie. Ainsi, l'intégration de systèmes solaires passifs, aussi appelés conceptions bioclimatiques dans la construction des bâtiments, peut réduire considérablement les besoins énergétiques de ce dernier pour le chauffage et le rafraîchissement des espaces (GAGO et *al.* 2015; LESKOVAR & PREMROV 2011; FREEWAN 2014). En outre, les systèmes d'énergie renouvelable peuvent être installés dans les bâtiments pour répondre à une partie importante des besoins énergétiques de ce dernier, en particulier dans les zones rurales où l'espace est disponible. Sans aucun doute, le système de chauffage solaire est de plus en plus adopté dans la préparation de l'eau chaude sanitaire (ECS) et le chauffage (PACHECO-TORRES et *al.* 2015; BADESCU 2011). Ce concept a un certain nombre d'avantages par rapport aux systèmes de chauffage conventionnels. Intégré à l'enveloppe du bâtiment, il permet d'économiser l'énergie destinée au chauffage des espaces de vie ou de travail. En outre, le système ne produit pas de bruit ni de courants d'air. A noter qu'un tel système est un système de chauffage à basse température ayant une distribution uniforme de la température (OLESEN 2002; ORAL & YILMAZ 2002).

L'Algérie bénéficie d'une situation géographique favorable qui offre l'un des potentiels solaires les plus élevés dans le monde, ce qui est très approprié pour les applications de systèmes solaires (STAMBOULI 2011; TZEMPELIKOS & ATHIENITIS 2007). Ainsi, pour améliorer l'efficacité énergétique, en vue de remplacer les combustibles fossiles utilisés dans le secteur du bâtiment, de nombreuses actions ont été entreprises, parmi lesquelles:

- Le développement de la réglementation thermique des bâtiments résidentiels, y compris trois codes de construction algériens:

- Le Document Technique Règlementaire C 3-2 qui établit les règles de calcul des déperditions calorifiques d'hiver pour les bâtiments (DTR C3-2 1998).
- Le Document Technique Règlementaire C 3-4 relatif aux règles de calcul des apports calorifiques d'été pour les bâtiments (DTR C3-4 1998).
- Le Document Technique Règlementaire C 3-31 relatif à la ventilation naturelle des locaux à usage d'habitation (DTR C3-31 1998).

- Le lancement de l'Agence nationale pour la promotion et la rationalisation de l'utilisation de l'énergie (APRUE) un projet de réalisation de 600 logements à "haute performance énergétique (HPE)" baptisé "Eco-Bât" sur l'ensemble du territoire national (JOURNAL-OFFICIEL 2004).

Dans le cadre du Projet MEDiterranean ENergy Efficiency in the Construction sector (MED-ENEC Project), une maison bioclimatique pilote de type rural a été conçue pour démontrer les approches intégratives pour la conservation de l'énergie dans le bâtiment et l'utilisation des énergies renouvelables dans ce secteur, après le lancement en 2005 d'un programme pour la construction de 1 million d'unités d'habitation, dont près de la moitié de ce programme (450 000 unités) est consacrée aux logements dans les zones rurales (IMESSAD et *al.* 2014). Quelques études ont examiné la performance énergétique de la maison pilote bioclimatique pendant l'été et d'autres pendant l'hiver. MOKHTARI et *al.* 2013 ont effectué des simulations numériques via le logiciel TRNSYS. Les températures obtenues sont comparées à celles mesurées expérimentalement au cours de deux campagnes (été et hiver). Les résultats montrent que les températures mesurées et simulées sont en bon accord. L'environnement de simulation TRNSYS est le logiciel le plus fréquemment utilisé pour le traitement des aspects thermiques de cette habitation. Les températures de l'air intérieur de la maison pendant la période estivale montrent qu'elles sont satisfaisantes car elles sont situées dans l'intervalle thermique de confort. Ceci permet de dire que l'isolation et la bonne inertie thermique des parois de la maison pilote

bioclimatique génèrent un environnement thermique convenable dans la période estivale sans utiliser les systèmes de climatisation. En période hivernale, il est à noter que les températures de l'environnement interne restent stables grâce à l'isolation et à l'inertie thermique des parois. Toutefois, durant cette période, les températures intérieures, quoique stables restent faibles (inconfort) et pour y remédier, on optera pour une installation de chauffage solaire. Avec cette solution, on restera toujours dans le cadre de la rationalisation de l'énergie et de protection de l'environnement. Les résultats de cette étude montrent qu'il est possible de réaliser des économies d'énergie en été et en hiver. IMESSAD et *al.* 2014 ont présenté une analyse thermique de la maison bioclimatique pilote en période estivale. Les simulations dynamiques avec le logiciel TRNSYS et les données expérimentales sont utilisées pour atteindre cet objectif. Les résultats obtenus montrent que la demande d'énergie pour le rafraîchissement est plus affectée par les valeurs de transmission thermique que par la masse thermique de l'enveloppe. En outre, il est constaté que l'utilisation des dispositifs d'ombrage horizontaux améliore le confort thermique des occupants. IMESSAD et *al.* 2014 ont proposé des recommandations pour la longueur optimale des ombrages pour les fenêtres qui sont situées dans la façade Sud.

III.2 Utilisation de l'énergie solaire dans le chauffage de l'habitat

Le rayonnement solaire parvient à la terre directement, diffus et réfléchi, en fonction notamment de la couverture nuageuse, de la pollution de l'air, de la région géographique et de la période de l'année (ROBERTSON & ATHIENITIS 2010). Il est également disponible sous différents types de ciel, partiellement couvert, partiellement dégagé et dégagé. Utilisée comme source d'énergie renouvelable, l'énergie solaire se présente comme l'une des plus prometteuses pour l'avenir. L'intérêt pour le solaire est notamment dû à son abondance à la surface de la Terre (ZERVOS et *al.* 2010). Historiquement, l'usage de l'énergie solaire afin de chauffer un fluide, ou un matériau est sans doute une des

premières voies de l'utilisation du rayonnement solaire. Les premières réalisations notables datent du XVIII^e siècle par l'usage de capteurs à concentration de conception complexe et nécessitant un suivi de la course solaire. Un autre domaine d'intérêt a été la production d'eau chaude pour des usages domestiques dont les premières réalisations ont été obtenues dans les années 1930. L'industrialisation des chauffe-eau solaires a commencé au début des années 1960 et s'est répandue très rapidement dans le monde entier. Le produit le plus courant consistait en capteurs plans de 3 à 4 m², un ballon de stockage d'eau chaude de 150 à 180 l ainsi qu'un ballon de stockage d'eau froide, l'ensemble étant intégré sur un seul support de l'habitat. Aujourd'hui plus de 30 millions de m² de capteurs solaires sont installés dans le monde. Un autre type de chauffe-eau solaire est le système à convection forcée pour lequel les capteurs sont en toiture et le ballon de stockage dans une zone technique du bâtiment. L'usage de l'eau chaude produite par les capteurs solaires pour le chauffage des locaux se développe en Europe depuis une dizaine d'années. Cette application prometteuse repose sur le couplage de deux sources thermiques (solaire et appoint provenant d'une chaudière ou d'une pompe à chaleur) et l'usage dans le bâtiment d'émetteur thermique (plancher chauffant, radiateurs ...etc.) fonctionnant à bas niveau de température (SABONNADIÈRE 2006).

III.2.1 Principes du chauffage solaire de l'habitat

Plusieurs systèmes solaires peuvent être utilisés afin de produire de la chaleur utile pour l'habitat. Ces systèmes peuvent être catégorisés en deux groupes distincts, soit passifs ou actifs. Le solaire thermique actif consiste à utiliser l'énergie solaire en ayant recours à des pièces mobiles (ventilateur, pompe...) qui convertissent l'énergie solaire en énergie thermique pour produire de la chaleur utile. Un tel système nécessite une énergie autre que solaire ; en général celle-ci est électrique. Le solaire thermique passif ou "chauffage solaire passif" consiste à utiliser l'énergie solaire le plus simplement possible, sans avoir

recours à une mécanique particulière, pour chauffer le bâtiment (BOUFFARD 2013).

III.2.1.1 Le solaire thermique actif

Le solaire thermique actif consiste à utiliser l'énergie solaire en ayant recours à des systèmes actifs (mécaniques) qui convertissent l'énergie solaire en énergie thermique pour produire de la chaleur (eau de piscine, eau chaude domestique, chauffage de l'air...etc.). Les systèmes thermiques actifs les plus courants sont les panneaux solaires thermiques non vitrés, les panneaux thermiques vitrés et les panneaux à tubes sous vide. Plusieurs autres systèmes solaires thermiques industrialisés existent sur le marché international. L'usage influence directement le choix du type de systèmes solaires thermiques afin d'obtenir le meilleur rendement possible (MUNARI PROBST et *al.* 2013). À travers le monde, la grande majorité des installations sont utilisées pour produire de l'eau chaude sanitaire pour des maisons individuelles. Fin 2012, 78 % des installations en services étaient dédiées à cet usage. Les capteurs solaires thermiques sont aussi utilisés pour des systèmes combinés (eau chaude sanitaire et chauffage de bâtiment), pour le chauffage de piscines, ou pour des procédés industriels.

Les capteurs solaires thermiques se répartissent en trois familles (BOUFFARD 2013) :

- Les capteurs à tubes sous vide : composés de tubes de verre qui abritent un absorbeur solaire , le fluide caloporteur circule à l'intérieur de tubes sous vide simples ou doubles. Le vide améliore l'isolation contre les pertes de chaleur. le panneau à tubes sous vide est plus efficace pour des températures entre 50 et 120 °C.
- Les capteurs plans vitrés: le fluide caloporteur, très souvent de l'eau mélangée à un anti-gel alimentaire, passe dans un serpentin plaqué en sous face d'une feuille absorbante, le tout placé derrière une vitre, dans un caisson isolé, la vitre est transparente à la lumière du soleil mais opaque aux rayons infrarouges de

l'intérieur, ce qui piège la chaleur. Le panneau vitré est idéal pour des températures variant entre 50 et 100 °C.

- Les capteurs non-vitrés : d'une structure très simple (réseau de tubes plastiques noirs) utilisés essentiellement pour le chauffage de l'eau des piscines en été ; ou les capteurs non-vitrés à revêtement sélectif, à irrigation totale, en acier inoxydable, utilisés essentiellement pour le préchauffage d'eau chaude sanitaire, le chauffage basse température et le chauffage des piscines. Le panneau non-vitré est idéal quand il est utilisé pour des applications nécessitant des températures moyennes entre 20 et 50 °C.

III.2.1.2 Le solaire thermique passif

Le solaire thermique passif ou chauffage solaire passif est l'utilisation des gains solaires passifs pour chauffer le bâtiment en saison froide. En plus de réduire la consommation énergétique du chauffage, les avantages du chauffage solaire passif sont nombreux. Selon (Heschong & Guillaud 1981), il permet entre autres :

- D'améliorer la sensation de bien-être thermique.
- De créer un microclimat favorable.
- D'assurer une ambiance chaleureuse et confortable.

Toutefois, les gains solaires qui traversent la fenestration augmentent le risque de pertes de chaleur importantes lorsque les fenêtres sont surdimensionnées ou mal isolées, particulièrement pendant la nuit en hiver, et augmentent le risque de surchauffe en été. Pour contrer les pertes de chaleur, il existe, entre autres, les fenêtres à double et triple vitrage offrant des performances accrues. Pour contrer la surchauffe, il existe plusieurs solutions architecturales, comme les avancées de toit (avant-couvertures), les fenêtres en retrait, les marquises, l'intégration d'arbres à feuilles caduques, les occultations solaires, etc. RHEAULT & BILGEN 1987-A; RHEAULT & BILGEN 1987-B ont d'ailleurs soulevé que des occultations solaires à Montréal peuvent réduire les charges de chauffage entre 30% et 70 % et les charges de refroidissement jusqu'à 90%.

Les systèmes passifs comprennent essentiellement: captation, stockage, restitution de l'énergie et contrôles. La captation s'effectue généralement par des

parois vitrées orientées au sud. Le stockage peut se faire soit par des parois à haute inertie spécialement conçues à cet effet ou par les éléments de la structure tels que murs, sol, ...etc. La restitution ou distribution de l'énergie s'effectue directement à partir du stockage par convection naturelle. Le contrôle est assuré soit manuellement par l'occultation nocturne des surfaces de captation, soit par des effets d'ombre sur les murs capteurs pour minimiser la captation en été (SFEIR & GUARRACINO 1981).

III.2.2 Le plancher solaire direct

Le Plancher Solaire Direct (PSD)¹, désigne le type de système solaire combiné le plus répandu à ce jour. En effet, le fluide caloporteur, (constitué la plupart du temps, d'un mélange d'eau et antigel), chauffé par les capteurs solaires, circule directement dans les tuyaux noyés dans le plancher sans passer par un réservoir de stockage. Grâce à sa forte inertie, la dalle assure les fonctions de stockage de l'énergie et de déphasage de sa restitution dans le volume chauffé (KHARCHI et *al.* 2001; MOKHTARI et *al.* 1998; PEUSER et *al.* 2005). Les installations actuelles ne posent aucun problème de santé et n'altèrent pas la circulation du sang dans les jambes car les systèmes existants aujourd'hui fonctionnent à basse température. La température du sol doit toujours être inférieure à 27 °C. Le plancher solaire direct (PSD) est une solution qui permet d'allier confort thermique, économies d'énergie et respect de l'environnement. Grâce à un circuit de dérivation, le système permet également de produire l'eau chaude sanitaire (PLANCHER SOLAIRE 2002).

Le PSD, dans son principe, offre des atouts décisifs que nous rappelons brièvement (KHARCHI et *al.* 1999; ABBAZ 2013):

- Stockage thermique de l'énergie solaire dans le plancher à forte inertie, à l'intérieur au volume habitable,

¹ PSD: Plancher Solaire Direct, un type de système solaire combiné qui associe des capteurs solaires thermiques et un plancher chauffant basse température servant à la fois de stockage et d'émetteur de chaleur, sans échangeur intermédiaire.

- Régulation simplifiée, généralement réduite à un thermostat différentiel contrôlant un circulateur unique,
- Confort basse température, uniformité de température de l'air ambiant (avantages des planchers chauffants).
- Economie d'investissement importante.
- Gain d'espace et suppression des radiateurs muraux.

III.3 Description de la maison et de ses systèmes de services

III.3.1 Caractéristiques de la maison étudiée

Cette étude traite une maison pilote bioclimatique à basse consommation énergétique, avec 90 m² surface de plancher nette (Figure III.1), située à la commune de Souidania à la wilaya d'Alger, selon les caractéristiques géographiques (latitude 36° 10' N, longitude 03° 00' E). Elle a été construite dans le cadre du projet MED-ENEC en partenariat avec le Centre de Développement des Energies Renouvelables (CDER) et le Centre National d'Etudes et de Recherches Intégrées du Bâtiment (CNERIB), tout en respectant le code algérien sur la construction.



Figure III.1 La maison pilote bioclimatique à Souidania (Alger)

La maison pilote, de conception bioclimatique, prend en compte les conditions climatiques et environnementales pour aider à obtenir un confort thermique

optimal à l'intérieur. La conception bioclimatique, par définition, répond aux besoins des êtres humains (thermique, lumineux et acoustique). Elle considère les conditions climatiques, en utilisant des techniques et des matériaux disponibles dans la région et tenter d'intégrer le bâtiment avec son environnement. En outre, la conception bioclimatique fondée sur des considérations liées à la physique du bâtiment, qui est la capacité de permettre à la lumière du soleil, la chaleur et le flux d'air à travers l'enveloppe du bâtiment, quand cela s'avère nécessaire, à certains moments de chaque jour et mois de l'année (OLGYAY 1963; SZOKOLAY 2004). La maison est orientée selon l'axe Est-Ouest pour recueillir plus de rayonnement solaire en hiver. Elle consiste en un séjour, deux chambres à coucher et une cuisine, comme le montre la figure III.2. Le séjour et la chambre 1 ont des fenêtres orientées au Sud, ce qui permet de profiter des gains solaires passifs pour chauffer la maison en hiver. Dans le côté Nord de la maison, on trouve la chambre 2, la salle de bain et les sanitaires. La chambre 2 a une fenêtre de 1,26 m² de surface orientée au Nord qui permet d'avoir une ventilation naturelle par rapport aux fenêtres qui se trouvent au côté Sud de la maison. La salle de bain et les sanitaires ont des fenêtres d'une surface de 0,5 m², chacune orientée au Nord. La cuisine et le séjour ont des fenêtres orientées vers l'Est, donnant sur un séchoir et une véranda, protégés par un demi-mur extérieur. Le séchoir est équipé d'un avant-toit qui permet de protéger la cuisine des rayons de soleils intenses en été tout en bénéficiant de l'éclairage naturel. La véranda permet d'avoir un espace à vivre agréable pour le bien-être des occupants de la maison. Protégée par une végétation, elle permet d'éviter les surchauffes d'été, tout en profitant des gains solaires passif pour chauffer la maison en hiver ainsi que l'éclairage naturel pendant toute l'année. Les murs de la maison sont construits en blocs de béton de terre stabilisée (BTS). Ses murs extérieurs et le sol sont bien isolées en utilisant du polystyrène expansé, le double vitrage et les dispositifs d'ombrage. Un débord de toit est utilisé pour les fenêtres orientées au Sud afin d'éviter le rayonnement solaire direct pendant la période estivale. De plus, cette maison

est équipée d'un système de chauffage solaire pour la production d'eau chaude sanitaire et le chauffage de l'espace.

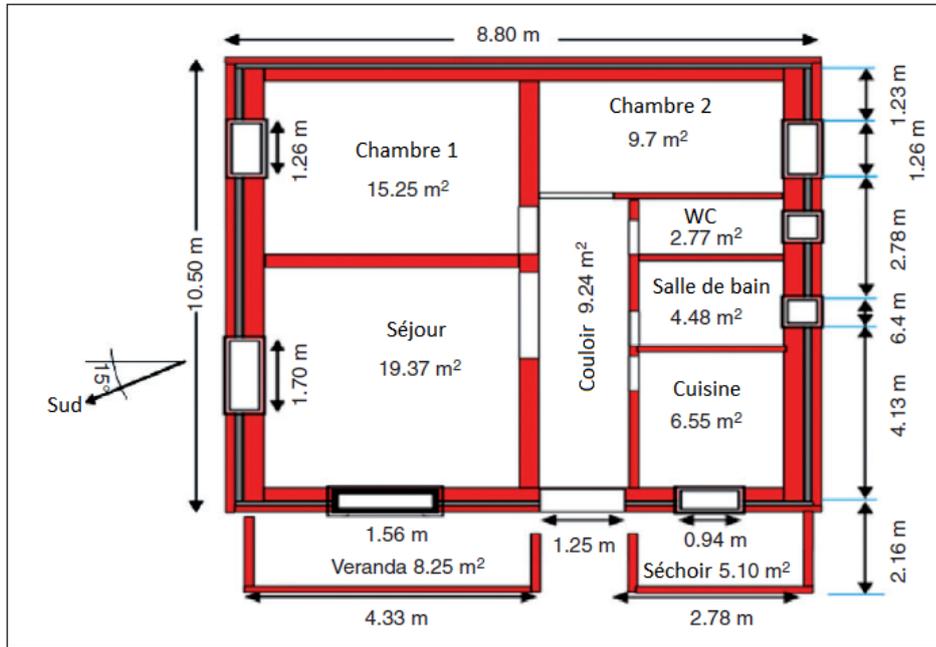


Figure III.2 Vue en plan de la maison pilote bioclimatique

La " valeur U " pour chaque mur de la maison pilote, ainsi que ceux d'une maison conventionnelle² en Algérie, sont rassemblés dans le tableau III.1. Il est utile de mentionner que, dans la majorité des logements dans la région d'Alger, les matériaux de construction sont semblables à ceux de la maison traditionnelle considérée dans le tableau III.1. les valeurs U des parois de la maison pilote sont cohérentes avec celles données par (IMESSAD et *al.* 2014) et par (MOKHTARI et *al.* 2013).

Tableau III.1 Propriétés des matériaux de construction pour la maison pilote et la maison conventionnelle en Algérie

| | Maison pilote bioclimatique | | | Maison conventionnelle | | |
|---------------|-----------------------------|---------------|--------------------------|------------------------|---------------|--------------------------|
| | Composition | Epaisseur (m) | U (W/m ² .°C) | Composition | Epaisseur (m) | U (W/m ² .°C) |
| Murs externes | BTS | 0,14 | 0,39 | Mortier | 0,02 | |
| | polystyrène expansé | 0,10 | | Briques | 0,1 | |

² Maison conventionnelle: C'est une maison faite sur la base de matériaux de construction courants dans la région ou classiques (parpaings, briques, etc.) et à l'aide de techniques courantes.

| | | | | | | |
|---------------|---------------------|-------|------|----------------|-------|------|
| | BTS | 0,29 | | Lame d'air | 0,04 | 1,24 |
| | | | | Briques | 0,1 | |
| | | | | Plâtre | 0,02 | |
| Plancher haut | Couche de mortier | 0,03 | 0,23 | Béton | 0,2 | 3,94 |
| | polystyrène expansé | 0,16 | | Plâtre | 0,02 | |
| | Béton | 0,08 | | | | |
| | Plâtre | 0,03 | | | | |
| | | | | | | |
| Plancher bas | Béton | 0,02 | 0,51 | Béton | 0,1 | 2,28 |
| | polystyrène expansé | 0,06 | | Mortier+sable | 0,03 | |
| | Béton | 0,15 | | Carrelage | 0,02 | |
| | Mortier+sable | 0,03 | | | | |
| | Carrelage | 0,02 | | | | |
| Mur intérieur | BTS | 0,14 | 2,94 | Briques | 0,14 | 1,92 |
| Vitrage | Double vitrage | | | Simple vitrage | 0,004 | 4 |
| | Verre transparent | 0,004 | | | | |
| | Lame d'air | 0,006 | 1,5 | | | |
| | Verre transparent | 0,004 | | | | |

III.3.2 Description du système de chauffage solaire

Dans cette étude, la maison considérée est une maison bioclimatique à haute efficacité énergétique. Pour rester dans le domaine de la rationalisation de l'énergie, elle a été dotée du système de plancher solaire direct (PSD). Ce système à basse température, lui permettra à la fois le chauffage de l'espace habitable, ainsi que la préparation de l'eau chaude sanitaire. La figure III.3 présente les différents composants de ce système. Les capteurs solaires thermiques (1) installés sur la partie supérieure du toit en pente (45 °) selon la latitude géographique du site, le ballon d'eau chaude sanitaire (2) et le plancher chauffant (7) représentent les principaux composants du système de chauffage solaire. Le principe de fonctionnement de ce système peut être résumé de la

manière suivante: La vanne à trois voies (5) est sous le contrôle d'un contrôleur différentiel (6) dans la station de pompage. A noter que la priorité est donnée à la charge (chauffage de l'espace intérieur). Ainsi, le système fonctionne comme un plancher solaire direct (PSD). Le générateur du capteur est relié directement au plancher chauffant; les dalles en béton combinent les fonctions du chauffage des locaux et de l'échangeur de chaleur. L'eau chauffée dans le capteur solaire circule à travers le plancher chauffant, puis retourne vers le capteur solaire. Il convient de noter que, si la température de la zone défavorable de la maison, qui est commandé par un thermostat (3) situé au plancher, est supérieure à la température de consigne, l'eau chaude est orientée vers le réservoir de stockage pour la préparation d'eau chaude sanitaire. La pompe simple (4) du système ne démarre que lorsque deux conditions sont disponibles: La température de sortie des capteurs est supérieure à la température de la zone défavorable de la maison ou supérieure à la température de l'eau au fond du réservoir. L'eau froide provenant de l'alimentation principale en eau de la ville, pénètre au fond de la cuve de stockage. Un dispositif de chauffage auxiliaire est utilisé pour assurer une température adéquate pour l'eau chaude.

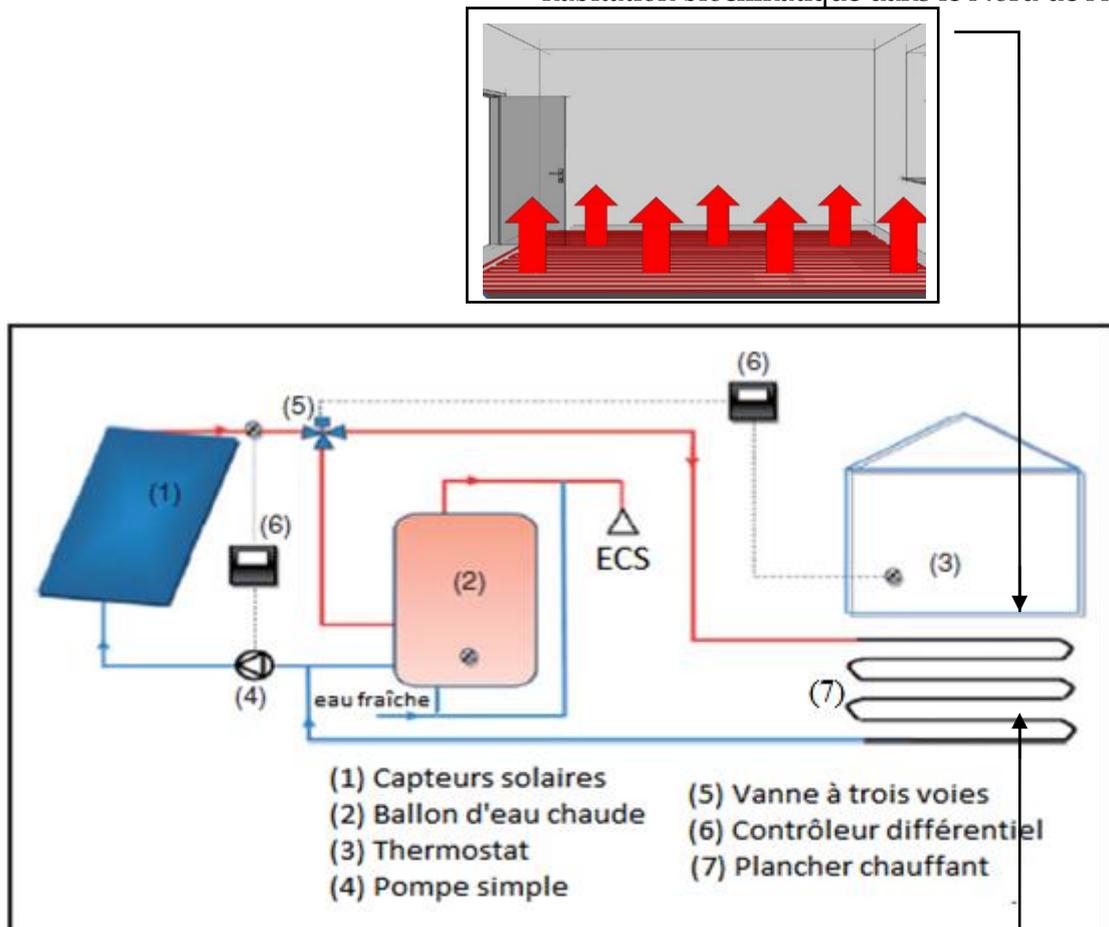
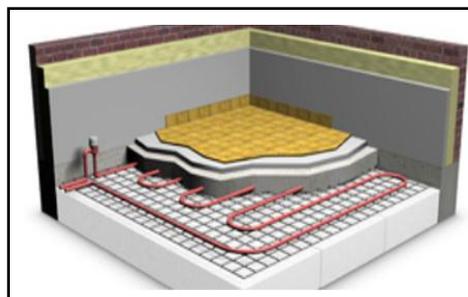


Figure III.3 Croquis du système de chauffage solaire



Les caractéristiques du capteur thermique, du réservoir de stockage, et le système de chauffage par plancher sont présentés dans les tableaux III.2, III.3 et III.4, respectivement.

Tableau III.2 Caractéristiques du capteur solaire thermique

| Paramètres | Valeur | Unité |
|---|--------|----------------|
| Surface du capteur | 8 | m ² |
| Capacité thermique spécifique | 4,19 | Kj/Kg.K |
| Facteur d'efficacité du capteur | 0,7 | - |
| Coefficient de pertes par la bordure inférieure | 3 | - |

| | | |
|------------------------------------|-------|---|
| Emissivité de la plaque absorbante | 0,7 | - |
| Absorption de la plaque absorbante | 0,8 | - |
| Nombre de couvertures | 1 | - |
| Indice de réfraction de couverture | 1,526 | - |

Tableau III.3 Caractéristiques du réservoir de stockage

| Paramètres | Valeur | Unité |
|--|--------|------------------------|
| Volume du réservoir | 0,3 | m ³ |
| Hauteur du réservoir | 1,25 | m |
| Capacité thermique spécifique | 4,19 | Kj/Kg.K |
| Densité du fluide | 1000 | Kg/m ³ |
| Coefficient de pertes du réservoir | 0,9 | Kj/h.m ² .K |
| Conductivité thermique du fluide | 1,40 | Kj/h.m.K |
| Diamètre intérieur de l'échangeur de chaleur | 0,01 | m |
| Diamètre extérieur de l'échangeur de chaleur | 0,012 | m |
| Longueur de l'échangeur de chaleur | 2 | m |
| Conductivité de la paroi de l'échangeur de chaleur | 1,40 | Kj/h.m.K |
| Conductivité des matériaux de l'échangeur de chaleur | 1,40 | Kj/h.m.K |

Tableau III.4 Caractéristiques du système de plancher chauffant

| Paramètre | Valeur | Unité |
|-----------------------------------|--------|----------------------|
| Chaleur spécifique de l'eau | 4,18 | Kj/Kg.K |
| Espacement entre les tuyaux | 0,2 | m |
| Diamètre extérieur du tuyau | 0,02 | m |
| L'épaisseur de la paroi du tuyau | 0,002 | m |
| Conductivité de la paroi du tuyau | 1,26 | W/m ² .°C |

III.4 Analyse des données météorologiques

La performance énergétique d'une maison est fortement dépendante des conditions climatiques où cette maison est située. Il convient de noter que la ville d'Alger est située au Nord de l'Algérie dans une zone côtière climatique

qui bénéficie d'un climat particulièrement tempéré en raison de l'influence modératrice de la mer. La côte algéroise bénéficie d'un climat tempéré. Elle est connue par ses longs étés chauds et humides avec de petites plages de températures diurnes. Les hivers sont froids et humides, la neige est très rare mais il n'est pas impossible de neiger. Les pluies sont abondantes et peuvent être diluviennes. Il fait généralement chaud surtout de la mi-juillet à la mi-août (CLIMAT 2015). Les figures III.4 et III.5 fournissent des données météorologiques représentatives d'Alger en termes d'évolutions temporelle de la température et du rayonnement solaire horizontal global. Les valeurs sont obtenues en faisant la moyenne des mesures quotidiennes fournies par le logiciel "Meteonorm 7" (METEONORM 2012) au cours des années 2000-2009.

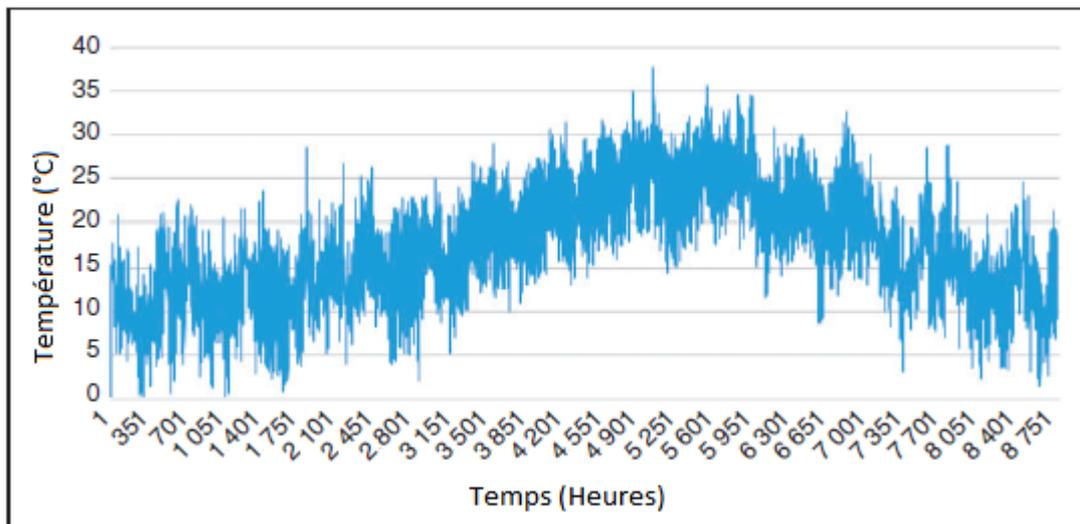


Figure III.4 Evolution horaire de la température ambiante à Alger (METEONORM 2012)

La température extérieure a une variabilité naturelle typique du climat en général (cycles saisonniers et journalier). Cette variabilité entraîne une variation sensiblement sinusoïdale de la température. Pendant une période de plus d'un an avec un pas de temps égal à 1 h, la figure III.4 représente les variations horaires de la température extérieure. Il est à noter que l'apparence générale de la variation de la température suit une distribution en forme de cloche à partir de la valeur minimale de 0,28 °C enregistrée au mois de Janvier jusqu'à ce qu'elle atteigne la valeur de crête de 37,88 °C en Juillet, considéré comme le

mois le plus chaud de l'année. Ensuite, les températures vont commencer à chuter jusqu'à la fin de l'année.

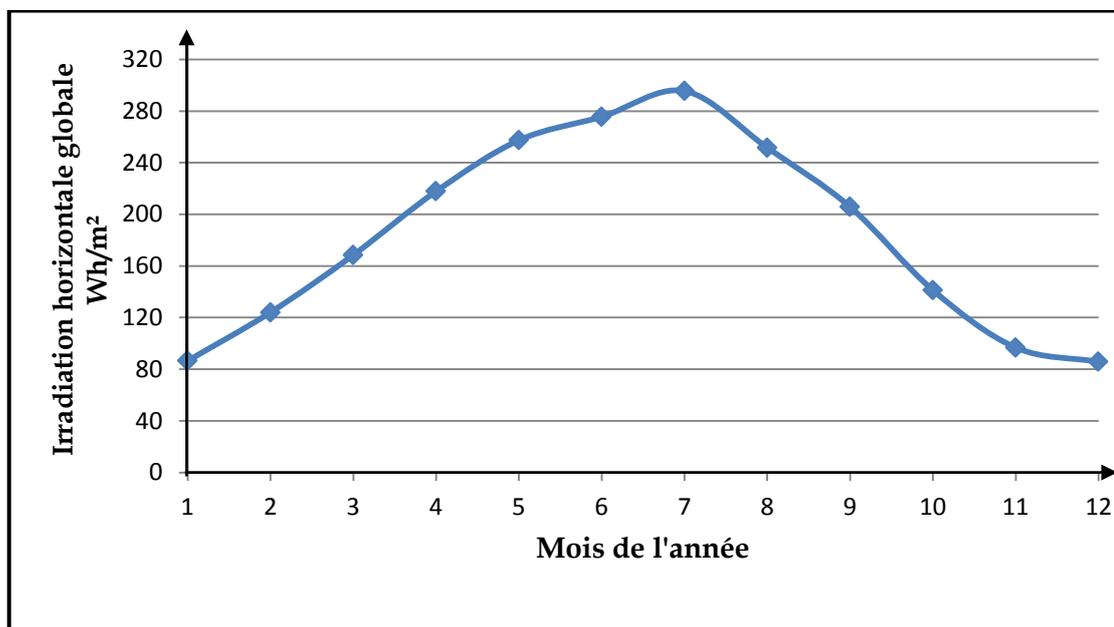


Figure III.5 Evolution mensuelle de l'irradiation horizontale globale à Alger (METEONORM 2012)

L'irradiation globale sur une surface horizontale a été collectée chaque 30 min. La figure III.5 montre une séquence de rayonnement reçue mensuellement sur une surface horizontale du site d'Alger, pendant une année.

Pour plus de détails, les tableaux III.5 et III.6 fournissent les maximums, minimums, et les moyennes mensuelles des températures et du rayonnement solaire horizontal global respectivement.

Tableau III.5 Moyenne mensuelle, maximum et minimum des températures (en °C) à Alger

| Mois | Moyenne mensuelle | Maximum | Minimum | Mois | Moyenne mensuelle | Maximum | Minimum |
|---------|-------------------|---------|---------|-----------|-------------------|---------|---------|
| Janvier | 11,07 | 16,82 | 6,13 | Juillet | 24,62 | 31,1 | 21,29 |
| Février | 11,77 | 16,47 | 7,97 | Août | 25,08 | 29,12 | 21,81 |
| Mars | 12,7 | 19,25 | 9,13 | Septembre | 22,79 | 27,95 | 18,70 |
| Avril | 14,46 | 19,29 | 11,06 | Octobre | 19,28 | 24,88 | 14,12 |
| Mai | 17,66 | 22,61 | 12,90 | Novembre | 14,93 | 22,42 | 9,56 |
| Juin | 20,89 | 25,05 | 17,18 | Décembre | 12,02 | 18,22 | 7,44 |

Tableau III.6 Moyenne mensuelle, maximale et minimale des radiations solaires horizontales globales (en W/m²/jour) à Alger

| Mois | Moyenne mensuelle | Maximum | Minimum | Mois | Moyenne mensuelle | Maximum | Minimum |
|---------|-------------------|---------|---------|-----------|-------------------|---------|---------|
| Janvier | 83,03 | 137,20 | 32,07 | Juillet | 283,68 | 331,56 | 114,07 |
| Février | 119,09 | 184,60 | 47,27 | Août | 242,02 | 297,23 | 139,65 |
| Mars | 161,71 | 260,96 | 57,42 | Septembre | 200,73 | 261,19 | 131,21 |
| Avril | 208,90 | 293,89 | 28,69 | Octobre | 135,55 | 194,28 | 62,09 |
| Mai | 247,09 | 318,97 | 94,16 | Novembre | 92,77 | 158,12 | 47,12 |
| Juin | 264,94 | 333,31 | 112,44 | Décembre | 82,32 | 119,24 | 15,74 |

D'après le tableau III.6, on observe que le rythme du changement de ces valeurs augmente au cours des premiers mois de l'année (Janvier à Avril). Il reste légèrement stable au cours de la période estivale de Juin à la mi-septembre, où les jours sont plus longs et pour lesquels la radiation solaire est plus intense, puis commence à diminuer jusqu'à la fin de l'année (Décembre). On notera que les mesures de la température ambiante et le rayonnement horizontal global concordent avec la moyenne de 22 ans du modèle "NASA SSE model" (NASA), avec une légère déviation de 1 °C.

III.5 Approche expérimentale de l'étude

III.5.1 Acquisition de données

Un système d'acquisition de données a été installé pour enregistrer les variables expérimentales. Ce système est constitué d'un ordinateur et d'un multimètre numérique modèle Keithley 2700. La figure III.6 illustre une esquisse du système d'acquisition utilisé pour étudier le comportement thermique de la maison pilote étudiée.

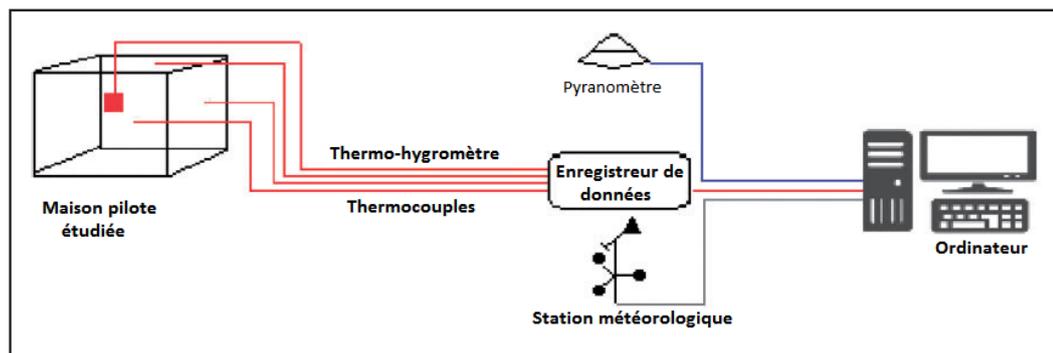


Figure III.6 Croquis du système d'acquisition

Un ensemble de thermocouples de type K sont utilisés pour mesurer la température à plusieurs endroits. Cinq thermocouples sont situés à l'extérieur de la maison pilote pour mesurer les températures des surfaces extérieures et 17 thermocouples sont positionnés à différents endroits à l'intérieur de la maison pilote pour fournir les températures des surfaces internes. Des thermo-hygromètres (TESTO 175-H1) sont installés à 1,5 m du sol pour mesurer la température interne de l'air ambiant et de l'humidité relative. Une station météorologique (WMR 918) est installée près de la maison pilote à 7 m du sol. Cette station est utilisée pour mesurer la vitesse du vent, l'humidité relative externe, et la température de l'air extérieur. Le rayonnement solaire global horizontal est mesuré avec un pyranomètre (CM3 Kipp & Zonen), monté conformément à la position de l'inclinaison du capteur. A noter que toutes les températures et les valeurs du rayonnement solaire global horizontal sont mesurées et enregistrées toutes les 30 minutes. Le tableau III.7 suivant présente les caractéristiques des différents équipements de mesure utilisés :

Tableau III.7 Equipements utilisés pour l'acquisition de données

| Désignation | Caractéristiques |
|--|---|
| <p>Thermocouples</p>  | <ul style="list-style-type: none"> - Type K - Composition: chromel (nickel + alliage de chrome) / alumel (nickel + aluminium (5%) + alliage de silicium) - Plage de température de fonctionnement: -200 à 1250 °C ou - 454 à 1250 °F - Tolérances standard: $\pm 2,2$ ou $\pm 0,75$ % - Tolérances spéciales: $\pm 1,1$ ou 0,4 % |
| <p>Thermo-hygromètres</p>  | <ul style="list-style-type: none"> - Type TESTO 175-HI: enregistreur de données professionnel - Grande capacité de mémoire à un million valeurs de mesure - Température de stockage: -20 à +55°C - Température de fonctionnement: -20 à + 55°C - Dimensions: 149 x 53 x 27 cm avec grand écran, facilement lisible |
| <p>Pyranomètre</p>  | <ul style="list-style-type: none"> - Type CM3 KIPP & ZONEN - Conçu pour une utilisation extérieure continue. En raison de son domaine spectral 300-2800 nm - Mesure l'irradiance allant jusqu'à 2000 W/m² avec un temps de réponse < 18s et sensibilité typique 10 μV/W/m² - Plage de température de fonctionnement: - 40 °C à +80 °C |

III.5.2 Résultats de l'étude expérimentale

III.5.2.1 Effet des stratégies bioclimatiques

Dans cette section, une expérience sur le terrain a été réalisée pour étudier l'impact des stratégies bioclimatiques sur le comportement thermique de la maison pilote sans utiliser le système de chauffage.

La figure III.7 illustre les variations de températures extérieures de l'air et le rayonnement solaire global horizontal de la surface plane du capteur thermique

incliné (45 °) pendant quatre jours du mois de Décembre (21 au 24 Décembre 2012). Une évolution a été présentée avec un pas de temps de 30 min.

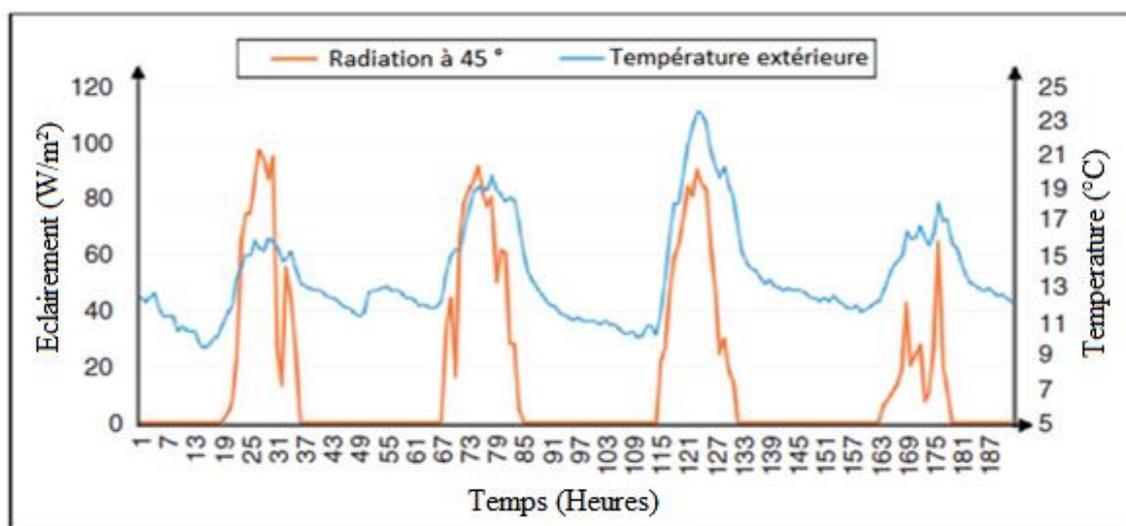


Figure III.7 Variation de la température extérieure et du rayonnement solaire au cours de la période considérée

À noter que Décembre est l'un des mois les plus froids et humides de l'année en Algérie. De ce fait, l'intensité du rayonnement solaire est considérablement réduite par la présence de nuages. Il semble évident que le rayonnement solaire joue un rôle significatif dans la conception des systèmes solaires, en raison de son impact substantiel sur la température de sortie du fluide caloporteur circulant dans le capteur solaire thermique. Il recueille directement la chaleur du rayonnement solaire pour chauffer le fluide. Une analyse de la figure III.7 permet de constater que le dernier jour est moins ensoleillé que les trois premiers jours, et il apparaît clairement que l'irradiation solaire est importante au cours de la période considérée. A noter que l'énergie interceptée par un collecteur est maximale lorsque le plan du capteur est perpendiculaire au rayonnement solaire, à midi. Le rayonnement solaire maximum pendant la période de contrôle varie entre 980 W/m² le premier jour et 600 W/m² au dernier jour. La température extérieure moyenne mesurée pendant la période considérée est de 13,78 °C, avec une valeur minimale de 9 °C et un maximum de 24 °C avec des températures de crête comprise entre 12 h et 15 h. Cependant, on peut noter de grandes fluctuations quotidiennes jusqu'à 13 °C, à l'extérieur. En outre, les conditions de

température de l'air intérieur peuvent avoir de grandes variations quotidiennes en fonction du niveau d'isolation thermique et de la masse thermique de l'enveloppe du bâtiment. Afin d'étudier l'efficacité de la conception solaire passive du bâtiment (avec de grandes fenêtres orientées au Sud et à l'isolation thermique élevée), une mesure sur le terrain a été effectuée sur la maison pilote au cours de la période considérée.

La figure III.8 montre l'évolution des températures surfaciques internes et externes du mur Sud de la maison du 21 au 24 Décembre 2012. Durant cette période, le système de chauffage a été mis hors service.

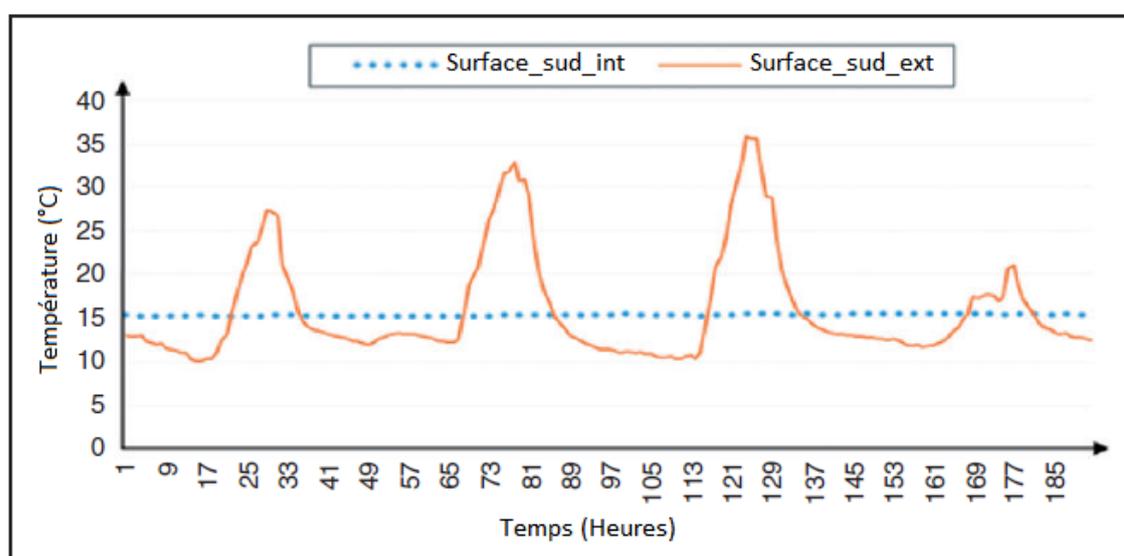


Figure III.8 Variation de la température surfacique du mur pendant la période considérée

Il a été observé que la face extérieure du mur Sud présente des fluctuations importantes. En comparaison, la température interne des parois de masse reste stable pendant la saison de chauffage. En outre, l'ombrage horizontal (avant-toit) placé au-dessus des fenêtres Sud empêche les radiations solaires pendant l'été tout en leur permettant de passer à travers, pendant l'hiver. Ainsi, il contribue aux économies d'énergie de la maison tout au long de l'année. Sur la figure III.8, on remarque que la température de la paroi interne est stable à 15 °C pendant toute la période considérée, malgré les fluctuations importantes de la face extérieure de la paroi qui se situent entre 10 °C et 35 °C entre le jour et la nuit. Ces résultats correspondent à ceux obtenus par (MOKHTARI et al. 2013) qui ont

analysé la température intérieure du mur Sud de cette maison pilote pour la saison d'hiver, du 11 au 15 Janvier. Ils ont constaté que l'évolution de cette température pendant 18 h varie entre 15,1 °C et 15,3 °C grâce à l'effet de l'isolation et l'inertie thermique importante des parois. En outre, la construction du mur de masse a la capacité de stocker la chaleur solaire absorbée pendant la journée et la restituer la nuit (DERRADJI et al. 2013).

En outre, il a été constaté que l'isolation thermique et la masse thermique sont efficaces pour stabiliser les fluctuations journalières de la température de la surface de la paroi interne. C'est ainsi qu'elles permettent de réduire les fluctuations des température intérieures de l'air, et donc d'améliorer la qualité de l'air intérieur.

La figure III.9 présente la variation horaire de la température mesurée de l'air intérieur dans le salon et la chambre 2 de la maison. Cette variation montre l'effet de l'emplacement de la pièce dans la maison et les fenêtres orientées vers le Sud sur le confort thermique intérieur.

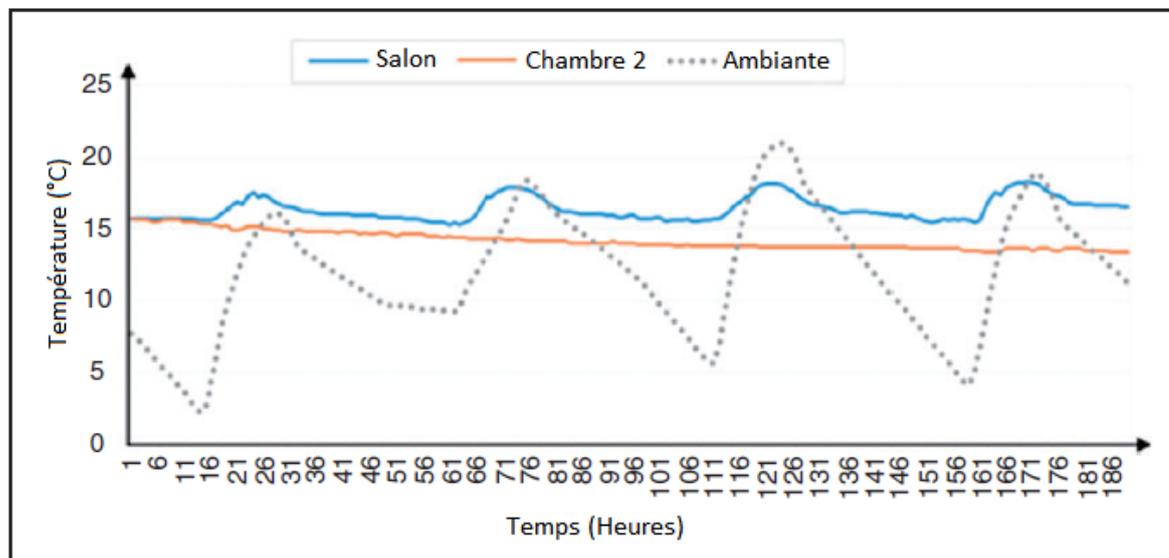


Figure III.9 Variations de la température intérieure dans la maison pilote pendant le période considérée

Les résultats expérimentaux présentés dans cette figure mettent en évidence l'effet de l'orientation du bâtiment sur la température intérieure du salon et de la chambre 2. La température ambiante mesurée au cours de cette période considérée varie entre 2 °C et une valeur minimum et 21 °C comme une valeur

maximale. Notez qu'une grande fluctuation quotidienne peut être remarquée à l'extérieur, atteignant jusqu'à 16 °C. Le salon, en raison de sa position orientée côté Sud et doté de grande surface vitrée orientée plein Sud, et caractérisé par une température légèrement supérieure à celle de la chambre 2. Par conséquent, la température de l'air intérieur dans le salon atteint 17,5 °C durant la journée et reste supérieure à 16 °C pendant la nuit. Les petites fluctuations de la température intérieure comparées aux fluctuations extérieures sont fortement liées à la fois à l'isolation et aux caractéristiques de masse thermique élevée de la maison. En ce qui concerne la chambre 2, sans gain solaire, il est constaté que les températures de l'air sont plus basses que celles de la salle de séjour, et la température intérieure diminue de jour en jour (de 15 °C à 13,5 °C). L'effet de l'orientation sur les besoins de chauffage et de refroidissement annuels d'une maison située dans le Nord-Ouest de l'Algérie a fait l'objet d'une étude faite par (MISSOUM et *al.* 2014). Leurs résultats montrent que l'énergie totale nécessaire pour offrir un confort tout au long de l'année quand la maison est orientée Nord/Sud est plus grande lorsque la maison est orientée Est/Ouest. Dans la phase de conception, une simple orientation de la maison Est/Ouest, avec le côté le plus long face au Sud, peut économiser un pourcentage significatif de l'énergie.

Ces résultats sont cohérents avec nos résultats et révèlent un effet significatif de l'orientation du mur sur la température à l'intérieur d'une telle maison bioclimatique. De plus, il est constaté que l'intégration des mesures d'efficacité énergétique en utilisant la méthode passive (isolation, masse thermique importante, orientation Sud) permet de réduire la fluctuation de la température interne de cette maison pilote.

III.5.2.2 Efficacité du système de chauffage solaire

Afin d'étudier l'efficacité du système de chauffage solaire actif, une expérience sur le terrain a été effectuée sur la maison pilote bioclimatique au cours de la période de surveillance. Au cours de cette période, le plancher chauffant est

activé pendant les deux premiers jours dans la chambre 2 et pendant les deux derniers jours dans la chambre 1.

La figure III.10 représente la température intérieure mesurée dans les chambres 1 et 2 fournie par le système de chauffage. La chambre 1 est orientée au Sud, et la chambre 2 a une orientation Nord. Au cours de la période considérée, les fenêtres restent fermées du 25 au 28 Décembre, et le système de plancher chauffant est exploité pour la chambre 2 seulement, alors que pendant les deux derniers jours, ce système est utilisé uniquement pour la chambre 1.

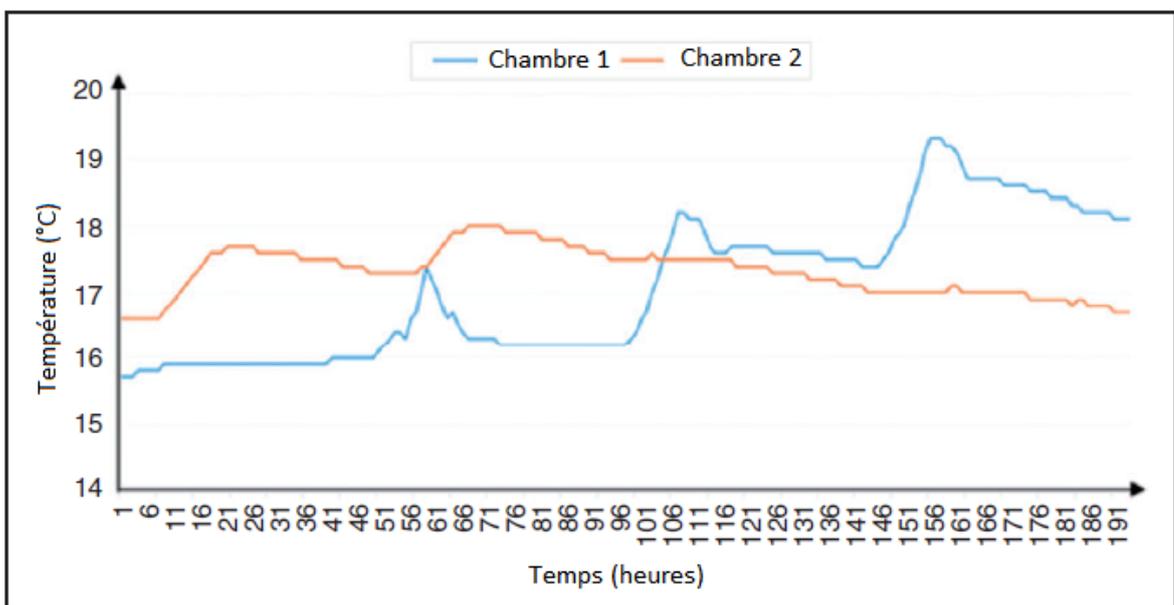


Figure III.10 Effet du plancher chauffant sur la température de l'air intérieur au cours de la période considérée

Pendant les deux premiers jours, la température de l'air intérieur de la chambre 2 atteint environ 16,5 °C à 18 °C. Au cours des deux derniers jours, les températures de l'air intérieur dans la chambre 1 sont dans la plage de 16,25 °C à 19,5 °C. Pendant les quatre jours de la période considérée, le système de chauffage est activé pour le même nombre d'heures pour chacune des deux chambres. La température de l'air intérieur pour les deux chambres augmente, mais la chambre 1 a une température légèrement supérieure à celle de la chambre 2. Ceci est dû à l'orientation Sud de sa fenêtre. En outre, la chambre 2 a une température de l'air, inférieure à la chambre 1, en raison de l'orientation au Nord de sa fenêtre.

Pour évaluer les résultats obtenus, nous les comparons avec ceux obtenus par (IMESSAD et *al.* 2015) qui ont évalué la température interne des deux chambres de la maison pilote pendant sept jours durant la période d'hiver (du 19 au 26 Mars 2014). Au cours de cette période de surveillance, il a été constaté que la température de la chambre 2 varie de 17,5 °C à 19 °C, alors qu'elle est comprise entre 18 °C et 19,9 °C pour la chambre 1. Ceci est lié au fait que la chambre 1 est orientée plein Sud, tandis que la chambre 2 est orientée au Nord. Ainsi, nous pouvons affirmer que nos résultats et ceux obtenus par (IMESSAD et *al.* 2015) pour les mêmes chambres évaluées sont conformes, le léger décalage des valeurs étant due à la fois à la période et la durée de l'évaluation. On peut voir qu'une importante économie d'énergie pour le chauffage peut être réalisée quand une masse thermique élevée, dans le cas d'une isolation optimale et un gain solaire passif (orientation Sud), et bien plus, avec un gain solaire actif (PSD).

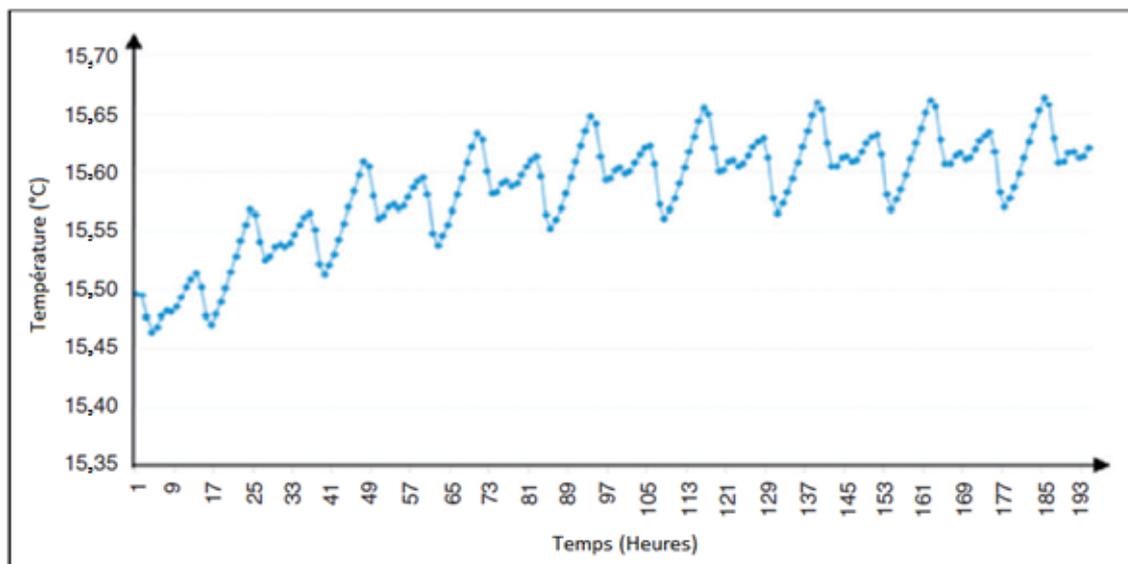


Figure III.11 Température moyenne du réservoir pendant la période de considérée

La figure III.11 montre la variation des températures moyennes du réservoir pendant la période considérée. On peut voir que la température dans le réservoir de stockage ne dépasse pas 16 °C. Comme la température de l'air intérieur de la zone défavorable reste inférieure à 20 °C, toute la chaleur recueillie à partir du capteur thermique est destinée au chauffage par plancher pour répondre aux

besoins de chauffage. Ces résultats sont compatibles avec le principe de fonctionnement d'un système de chauffage par PSD (WEISS 2003).

III.6 Résultats de la simulation

III.6.1 Validation du modèle

Un modèle de TRNSYS d'un système de chauffage solaire alimentant une maison bioclimatique individuelle pilote a été validé par l'enregistrement de l'évolution de la température intérieure de l'air des différentes zones de la maison étudiée. La température de l'air extérieur et du rayonnement solaire enregistré à 45 ° sont utilisées comme données d'entrée pour TRNSYS. La précision du modèle est effectuée en fournissant la déviation qui est donnée dans la relation suivante (RUIZ & MARTINEZ 2010) :

$$Deviation = \frac{\sum_{i=1}^N (T_{i,pred} - T_{i,mean})^2}{N} \quad (III.1)$$

Où:

$T_{i,pred}$, $T_{i,mean}$: températures de l'air intérieur prédites et mesurées, respectivement. La figure 12 montre une comparaison entre les températures intérieures mesurées et ceux obtenues par simulation durant quatre jours en Décembre (du 21^{ème} au 24^{ème} jour, en 2012) de la période de suivi. La comparaison est effectuée pour la température à l'intérieur des chambres 1 et 2. La température extérieure moyenne mesurée au cours de cette période est de 8 °C, avec une valeur minimale de 2,5 °C et un maximum de 20,3 °C. La fluctuation quotidienne atteint jusqu'à 15 °C.

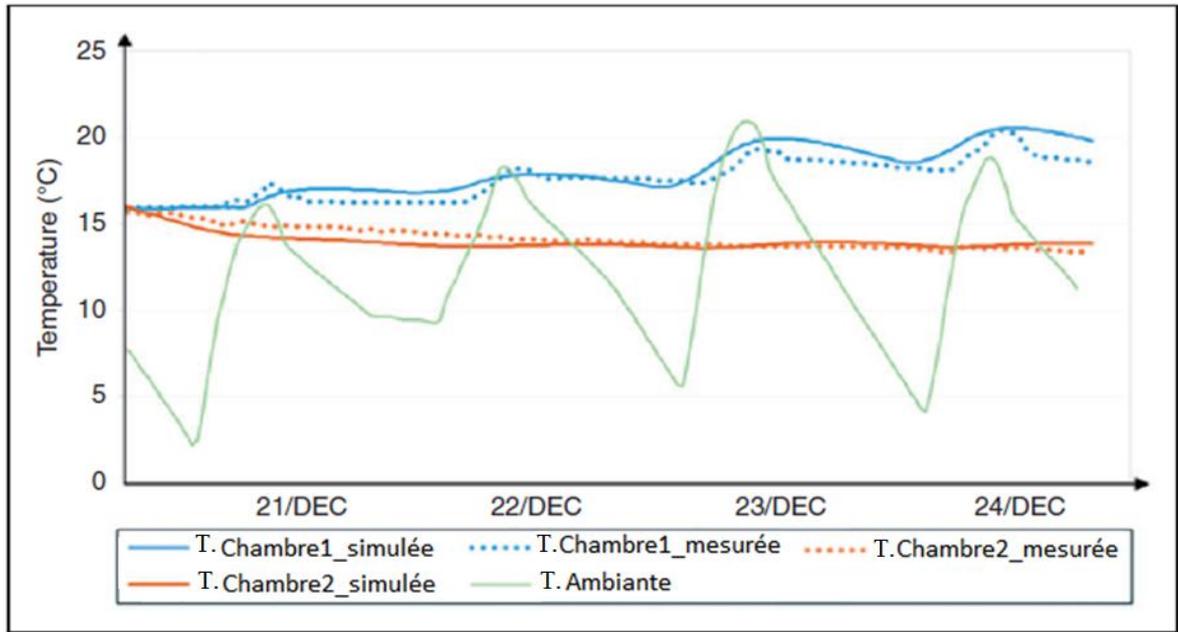


Figure III.12 Températures mesurées et simulées de l'air intérieur des deux chambres de la maison pilote

Comme on peut le voir sur la figure III.12, la chambre 1 a une température très proche de la température neutre recommandée pour la période d'hiver. On constate que la température intérieure de la chambre 1 présente une valeur moyenne de 16 °C lorsque la température extérieure atteint 2,5 °C. Quant à la chambre 2 qui a une paroi faisant face au Nord, elle a une température inférieure à celle de la chambre 1. Il convient de noter que les petites variations de températures intérieures par rapport aux fluctuations extérieures sont fortement liées à la fois à l'isolation et aux caractéristiques de masse thermique élevée de l'enveloppe du bâtiment. Qualitativement, la température simulée reste fidèle à l'évolution des valeurs expérimentales. Par ailleurs, on peut dire que le modèle considéré reproduit avec succès le comportement thermique des deux chambres.

Tableau III.8 Déviation et valeurs des températures

| | T_{\min} valeur de différence (°C) | T_{mean} valeur de différence (°C) | T_{\max} valeur de différence (°C) | Déviation |
|----------|--------------------------------------|---|--------------------------------------|-----------|
| Chambre1 | 0,00 | 0,57 | 1,55 | 0,48 |
| Chambre2 | 0,01 | 0,36 | 0,82 | 0,18 |

En examinant le tableau 8, il est clair qu'il y a une bonne concordance entre les données expérimentales surveillées et les résultats de simulation. Sur la base des résultats présentés, nous pouvons affirmer que le modèle développé est capable de prédire correctement les conditions thermiques intérieures et la consommation énergétique de la maison.

III.6.2 Analyse du bilan énergétique

Afin de montrer l'effet de la conception bioclimatique sur la performance énergétique d'une maison, on compare la demande d'énergie entre deux maisons identiques, avec une construction conventionnelle pour la première et une conception bioclimatique pour la seconde. La demande d'énergie mensuelle résultante pour les deux maisons est représentée sur la figure III.13. Sur cette figure, les histogrammes bleu et orange indiquent les besoins de chauffage de la maison conventionnelle et la maison pilote bioclimatique, respectivement.

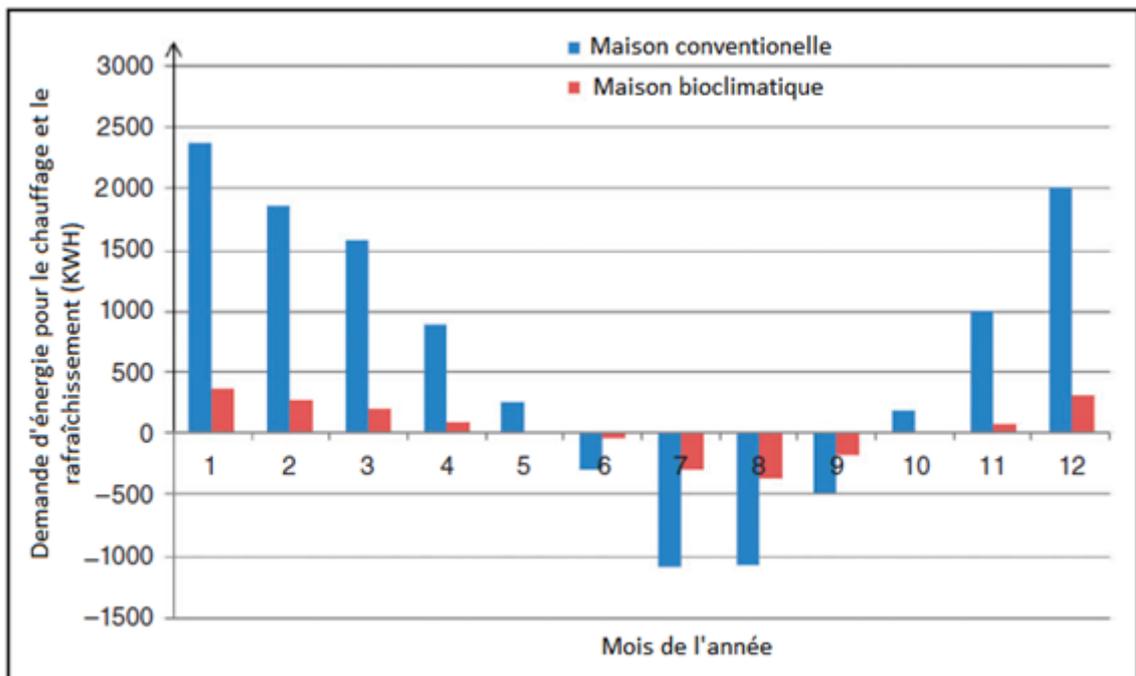


Figure III.13 Besoins énergétiques mensuels de la maison bioclimatique et conventionnelle

Nous constatons que la demande mensuelle d'énergie de la maison conventionnelle est très importante. Par exemple, ses besoins de chauffage sont environ 230 et 140 kWh pour les mois de Mai et Octobre, respectivement. Quant

à la maison pilote bioclimatique, elle n'a même pas besoin de chauffage au cours de ces deux mois. Un tel écart est principalement dû aux matériaux classiques³ utilisés dans la construction de la maison conventionnelle. Alors que la demande mensuelle d'énergie de la maison bioclimatique reste faible, grâce à son excellente isolation, et à son inertie thermique, qui permettent de procurer un bon confort thermique à l'intérieur. Rappelons que les besoins de chauffage négatifs des deux types de maison représentent en fait, la demande pour la climatisation (rafraîchissement), pour les mois de Juin, Juillet, Août et Septembre. Pour démontrer l'importance des techniques du rafraîchissement passif convenu dans la conception bioclimatique, (FEZZIOUI *et al.* 2012), ont proposé une simulation du comportement thermique de plusieurs maisons opérationnelles sous climat Maghrébin. Les données des besoins annuels pour le chauffage et le rafraîchissement des maisons de conception moderne et traditionnelle (bioclimatique), montrent que l'architecture traditionnelle réduit de manière significative ces besoins des maisons situées dans les régions du Nord, du centre et du Sud de l'Algérie. Les résultats présentés dans la figure III.13 confirment que l'intégration de la conception bioclimatique peut être un moyen efficace pour réduire la demande d'énergie, en particulier pendant les mi-saisons. De toute évidence, cette demande d'énergie est considérablement réduite à la fois par l'isolation et les caractéristiques de masse thermique élevée de l'enveloppe du bâtiment.

La figure III.14 suivante présente une comparaison entre les demandes d'énergie annuelles des deux maisons pour la demande de chauffage et rafraîchissement.

³ Matériaux classique: C'est des matériaux tels que le parpaing, les briques pleines et les briques creuses. Leur pouvoir isolant est faible. Ils doivent donc obligatoirement être associés à une isolation renforcée, afin d'obtenir une maison bien isolée.

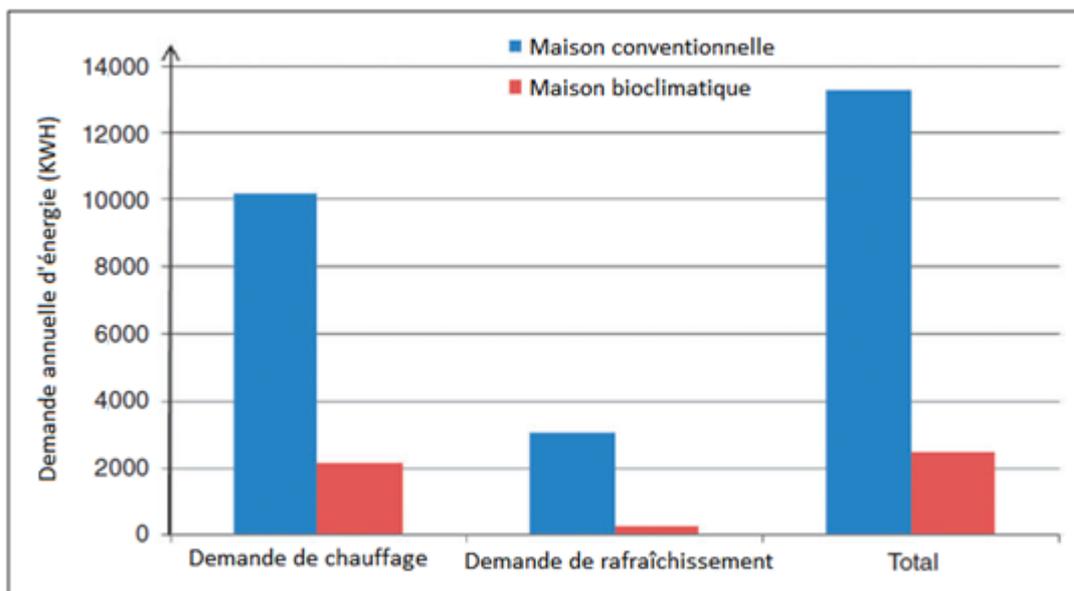


Figure III.14 Besoins énergétiques annuels de la maison conventionnelle et maison bioclimatique

La figure III.14 représente une comparaison entre les histogrammes représentant la demande de chauffage, la demande de rafraîchissement, et la demande d'énergie annuelle totale, respectivement. En bleu est représentée la demande annuelle d'énergie (kWh) de la maison conventionnelle, tandis qu'en rouge est représentée la demande annuelle d'énergie (kWh) de la maison pilote bioclimatique. La demande annuelle totale d'énergie pour la maison conventionnelle est de 13105 kWh dont 10148 kWh pour le chauffage et 2957 kWh pour le rafraîchissement. Cependant, dans le cas de la maison bioclimatique, la demande annuelle totale d'énergie est seulement 2259 kWh, avec une réduction d'environ 82% par rapport à celle d'une maison conventionnelle. De même, la demande annuelle d'énergie pour le chauffage est de 1398 kWh et de 861 kWh pour le rafraîchissement, avec une réduction de 86 % et 71 %, respectivement. Bien que la conception et la disposition des pièces à l'intérieur sont les mêmes entre les deux maisons, la différence entre le bilan énergétique est très important.

III.6.3 Amélioration du confort thermique

Pour améliorer davantage le confort thermique dans la maison pilote bioclimatique, une étude paramétrique est réalisée pour mettre en évidence l'effet

de l'augmentation de la taille de la fenêtre exposée au Sud sur la demande d'énergie pour le chauffage, l'effet des protections solaires, et la ventilation nocturne⁴ sur la demande d'énergie pour le rafraîchissement.

III.6.3.1 Effet de la taille de la fenêtre

Afin d'étudier l'effet de la taille des fenêtres orientées vers le Sud sur la demande d'énergie de la maison pilote, différents ratios fenêtre-à-mur allant de 10 % à 90 % sont considérés. Les ratios fenêtre-à-mur représentent le pourcentage qu'occupe la taille de la fenêtre au Sud, par rapport à la taille totale du mur Sud.

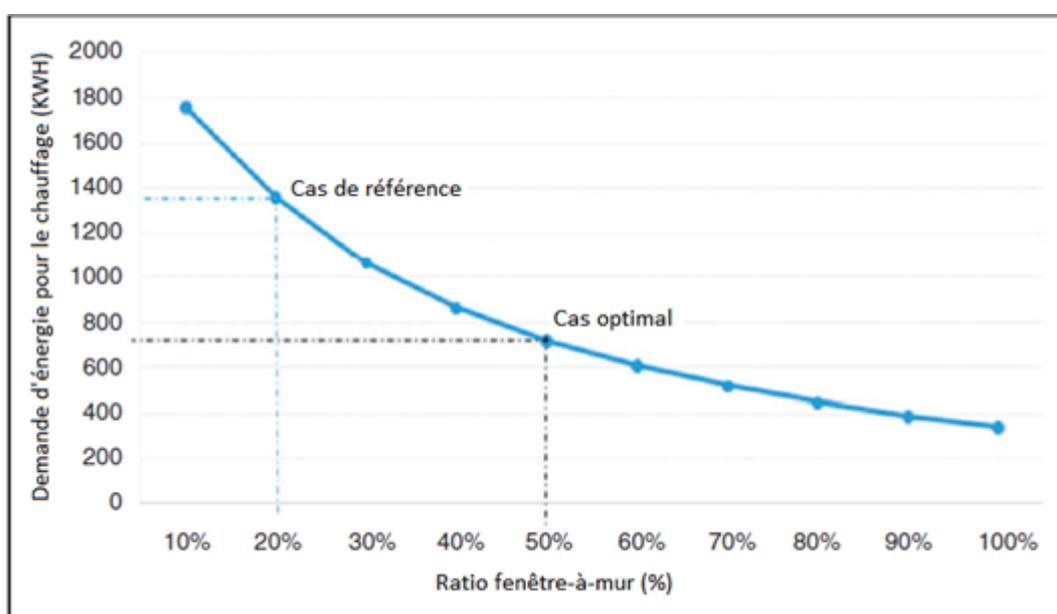


Figure III.15 Effet de la taille de la fenêtre sur la demande d'énergie pour le chauffage

Comme on peut le voir sur la figure III.15, les besoins de chauffage diminuent rapidement de 1764 à 719,2 kWh, lorsque le ratio fenêtre-à-mur passe de 10 % à 50 %. Cela est dû au fait que la grande quantité de gain de chaleur solaire utile est produite par les fenêtres qui sont situées sur la façade Sud. Au delà de cette valeur de ratio fenêtre-à-mur, la diminution de la demande de chauffage devient

⁴ Ventilation nocturne: Connue beaucoup plus sous son nom en anglais "Night cooling", qui se réfère à l'opération de la ventilation naturelle (sans recours aux systèmes mécaniques) pendant la nuit afin de purger l'excès de chaleur accumulé pendant la journée et de refroidir la structure du bâtiment. Un bâtiment avec une masse thermique optimale, qui peut être exposée à la ventilation nocturne, peut réduire les températures diurnes maximales de 2 à 3 °C en utilisant cette stratégie.

plus faible. Ainsi, le ratio fenêtre-à-mur optimal de 50 % pour une exposition Sud est adopté dans cette étude. Le ratio fenêtre-à-mur peut avoir des effets contraires si le gain solaire et la durée de la lumière du jour pendant l'hiver augmentent, car cela pourrait conduire à une surchauffe pendant l'été (LARTIGUE et *al.* 2014). Par conséquent, l'augmentation de la taille des fenêtres de la façade Sud de 50 % par rapport à la taille des fenêtres d'origine ne peut se faire sans la présence impérative d'un dispositif d'ombrage extérieur qui permettrait d'éviter la surchauffe en été et de faire des économies d'énergie pour de la demande en chauffage, en réduisant les besoins énergétiques totaux de 48,70 %. La forte demande en rafraîchissement due à l'augmentation de la taille de la fenêtre est facilement évitée en utilisant des dispositifs d'ombrage. La question du dimensionnement correct des avant-toits par rapport à la taille des fenêtres pour cette maison bioclimatique pilote a été étudiée par (IMESSAD et *al.* 2014). Aussi, ces auteurs notent que pour bénéficier du rayonnement solaire pendant la saison de chauffage, une augmentation de la surface vitrée vers le Sud améliore l'éclairage naturel de la maison, en particulier dans les zones rurales où les brise-soleils solaires sont absents.

III.6.3.2 Effet de la ventilation nocturne et des dispositifs d'ombrage

Afin d'améliorer davantage le confort thermique en été, on étudie l'effet de la ventilation nocturne associée à l'utilisation de protections solaires (dispositifs d'ombrage). Pour la ventilation nocturne, nous considérons que la maison est naturellement ventilée en ouvrant les fenêtres pendant la nuit et en les fermant pendant la journée. La maison profite de l'air frais arrivant de l'extérieur pendant la nuit en ouvrant des fenêtres, pour réduire ainsi la température de l'air intérieur et la température de la structure du bâtiment.

Les dispositifs d'ombrage, comme l'avant-toit bloquent le rayonnement solaire direct, à certains moments de la journée ou de l'année. Ils doivent être conçus de telle sorte que leurs positions puissent être adaptées aux ouvertures extérieures, à toutes les saisons de l'année (BOUCHLAGHEM 2000). Selon (FLORIDES et *al.* 2002), un important avant-toit, diminue la demande d'énergie

pour le rafraîchissement, mais augmente l'énergie nécessaire pour le chauffage, du fait que certains rayonnements solaires utiles ne pénètrent pas pendant l'hiver.

Pour la maison considérée dans cette étude, nous utilisons des avant-toits horizontaux, dimensionnés afin de les utiliser en hiver sans bloquer les rayonnements solaires nécessaires au chauffage d'hiver (PACHECO et *al.* 2012). En conséquence, la maison est complètement ombragée en été et bénéficiera du rayonnement solaire en hiver. Pour le confirmer, une analyse des températures intérieures de la maison étudiée pendant toute l'année a été établie. La figure III.16 montre une comparaison entre le nombre d'heures dans différentes plages de température (<20°C; 20-26°C; >26°C; >28°C), avec et sans utilisation de ventilation nocturne. On peut constater que l'utilisation de la protection solaire et la ventilation nocturne permettent une amélioration significative du confort thermique à l'intérieur de la maison tout au long de l'année.

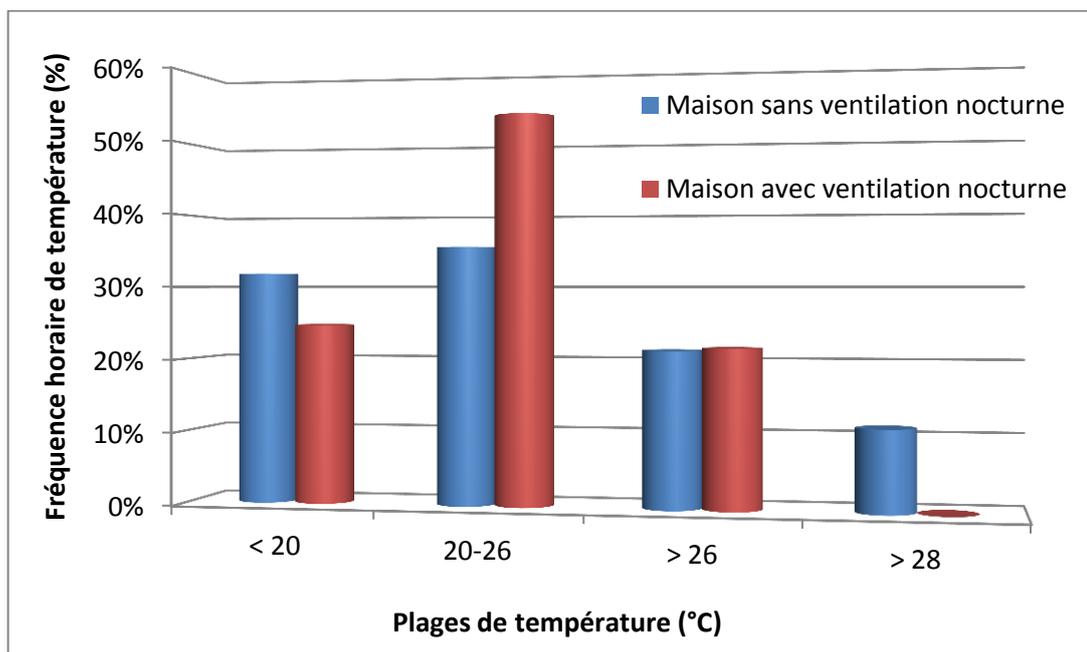


Figure III.16 Fréquence horaire pour les zones de confort thermique à l'intérieur de la maison en été

Le confort thermique a été évalué en fonction des températures intérieures horaires calculées. Un tracé de fréquence de température résultant des températures intérieures de la maison bioclimatique avec et sans ventilation

nocturne est présenté à la figure III.16. Nous pouvons affirmer que la gamme de confort thermique est comprise entre 20 °C et 26 °C. Il est clair qu'il y a une différence entre les deux cas. La maison sans ventilation nocturne nécessite un besoin énergétique plus élevé pour maintenir la maison dans la gamme de confort thermique. Dans ce cas, le nombre d'heures en dehors de la plage de confort thermique est significativement plus élevé.

En divisant le nombre d'heures de chaque plage de température sur le nombre d'heures totales considéré et en multipliant le résultat par cent, on obtient la fréquence en pourcentage des températures intérieures de la maison (tableau III.9).

Tableau III.9 Fréquence horaire pour les zones de confort thermique à l'intérieur de la maison bioclimatique avec et sans ventilation nocturne

| Plage de température | Fréquence horaire de températures (%) | |
|--------------------------------------|---------------------------------------|---------------------------|
| | sans ventilation nocturne | avec ventilation nocturne |
| Heures annuelles inférieures à 20 °C | 31,84 | 24,70 |
| Heures annuelles entre 20-26 °C | 35,47 | 53,55 |
| Heures annuelles supérieures à 26 °C | 21,40 | 21,74 |
| Heures annuelles supérieures à 28 °C | 11,26 | 0 |

Comme le montre le tableau III.9, les températures intérieures sont en-dessous de 20 °C pendant 2790,53 h (31,84 %) de l'année et au-dessus de 26 °C pendant 1875 h (21,40 %) de l'année. Cependant, dans le cas de la ventilation nocturne, les températures intérieures sont inférieures à 20 °C pour 2163 h (25,04 %) de l'année et supérieures à 26 °C pendant seulement 1905 h (21,74 %) de l'année, alors que le nombre d'heures où les températures sont supérieures à 28°C pendant l'année est nul. En effet, la température intérieure de cette maison ne dépasse pas 28 °C en été. On peut déduire que la ventilation nocturne refroidit l'air intérieur et l'enveloppe exposée, qui a stocké la chaleur de la journée. Par conséquent, on constate que la ventilation nocturne diminue à la fois les températures nocturnes et diurnes de l'air intérieur de la maison. On peut

conclure que la ventilation nocturne naturelle permet d'optimiser le rafraîchissement passif, sans frais supplémentaires et procure une sensation de confort à l'intérieur de la maison.

III.6.3.3 Contribution du système de chauffage solaire

Afin d'étudier l'impact du plancher solaire direct (PSD) sur les besoins énergétiques annuels de la maison bioclimatique pilote, une simulation dynamique est réalisée pendant une année. La figure III.17 représente la demande d'énergie de chauffage de l'espace de la maison avec et sans PSD.

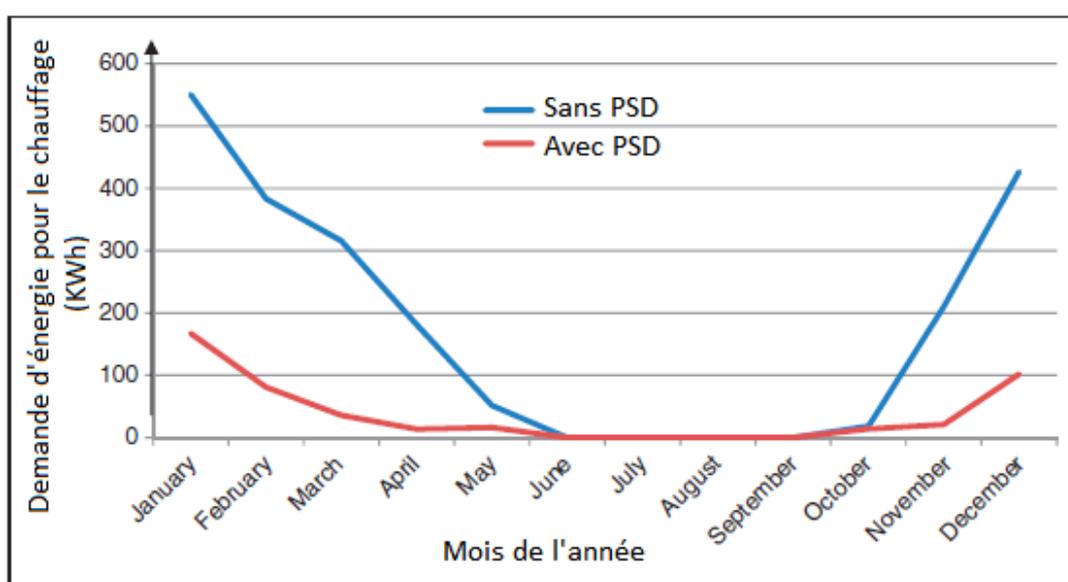


Figure III.17 Demande d'énergie pour le chauffage de la maison avec et sans utilisation de PSD

Le PSD est associé à la réduction des besoins énergétiques pour le chauffage par temps froid et peut donc être considéré comme un système d'économie d'énergie. Ce système, avec une faible température de fonctionnement semble, adapté pour chauffer des bâtiments ayant une inertie thermique élevée. Ce système n'utilise pas de réservoir de stockage thermique supplémentaire, puisque l'énergie solaire collectée est stockée directement dans la dalle pour chauffer la maison. La figure III.17 montre que la demande d'énergie pour chauffer la maison bioclimatique pilote dotée d'un PSD est plus faible par rapport à celle qui n'en possède pas. En effet, l'énergie totale nécessaire pour fournir la quantité de chaleur requise tout au long de l'année est d'environ 1398

kWh lorsque la maison est simulée sans PSD, et environ 451 kWh quand il est simulé avec PSD. L'utilisation d'un système PSD couvrira 67,74 % de la demande d'énergie pour le chauffage de la maison. Ainsi, l'utilisation d'un système de plancher solaire direct couvrira une part importante des besoins en énergie pour le chauffage tout en restant dans le contexte de la rationalisation de l'énergie et de la protection de l'environnement.

L'analyse des économies d'énergie par l'utilisation d'un PSD dans une cellule expérimentale de 40 m² a été étudiée par (MOKHTARI et *al.* 1998). L'unité bien isolée, composée de deux chambres de mêmes dimensions, est située à Oran, au Nord de l'Algérie. Les résultats obtenus montrent que l'utilisation du PSD a permis une économie de 69 % pour le chauffage tout au long de l'année. Ces résultats, semblables à ceux de notre étude, confirment que l'adoption de la technique du PSD en climat algérien est très prometteuse.

III.7 Impact environnemental

La réduction de la consommation d'énergie d'un bâtiment est réalisée en installant des appareils à faible consommation énergétique ou des systèmes d'énergie renouvelable sur place. Cela permettra de réduire les émissions de gaz à effet de serre (GES) en raison de la réduction de sa demande énergétique (ABDALLAH & EL-RAYES 2015). Afin d'évaluer la réduction de l'impact négatif sur l'environnement en raison de l'utilisation de systèmes solaires passifs et actifs dans la maison bioclimatique pilote, la réduction des émissions de GES doit être calculée. Les principales émissions de gaz à effet de serre provenant de l'exploitation du bâtiment comprennent le dioxyde de carbone (CO₂), les oxydes d'azote (N₂O), le méthane (CH₄) et l'ozone (O₃). Ces gaz peuvent être représentés en quantités équivalentes d'émissions de CO₂ à l'aide de leurs facteurs potentiels de réchauffement planétaire élaborés par le Groupe d'experts Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat (GIEC) (BERNSTEIN et *al.* 2007). Le calcul simplifié des émissions de CO₂ (FRITSCHÉ & SCHMIDT 2004), appliqué à cette partie de l'étude, ne prend pas en compte l'énergie totale utilisée au cours du cycle de vie du logement. Comme celles utilisées pour la

production de matériaux de construction, le transport et le recyclage après la démolition de l'habitation. Les émissions de CO₂ spécifiques sont calculées en fonction de la consommation annuelle d'électricité et de gaz naturel. Les facteurs de conversion moyens suivants, de l'électricité et du gaz naturel, aux émissions de CO₂, sont utilisés pour le calcul.

- 0,65 kg de CO₂ /kWh d'électricité consommée
- 0,27 kg de CO₂/kWh de gaz consommé

En effet, l'énergie contenue dans 1 m³ de gaz varie en fonction de la composition du gaz (gaz H "Haut pouvoir calorifique" en Algérie), de l'altitude du site pour le quel e gaz est livré et de la pression de livraison et c'est le coefficient de conversion qui permet de calculer la quantité d'énergie (exprimée en kWh) contenue dans un m³ de gaz naturel selon la formule suivante :
nombre de m³ x coefficient de conversion = nombre de kWh.

Les émissions de CO₂ d'une habitation sont considérées comme un indicateur de la qualité de sa conception, ainsi que de sa qualité thermique architecturale. Dans le cadre de cette étude, l'évaluation environnementale effectuée (figure III.18) a clairement montré la différence entre les émissions de CO₂ pour trois cas d'études. Les histogrammes présentent les émissions spécifiques de CO₂ pour la maison conventionnelle, pour la maison bioclimatique pilote sans système de chauffage solaire et pour la maison bioclimatique pilote avec système de chauffage solaire, respectivement. Ces histogrammes montrent des émissions spécifiques pour l'électricité consommée (en orange) et les émissions spécifiques pour le gaz naturel consommé (en bleue).

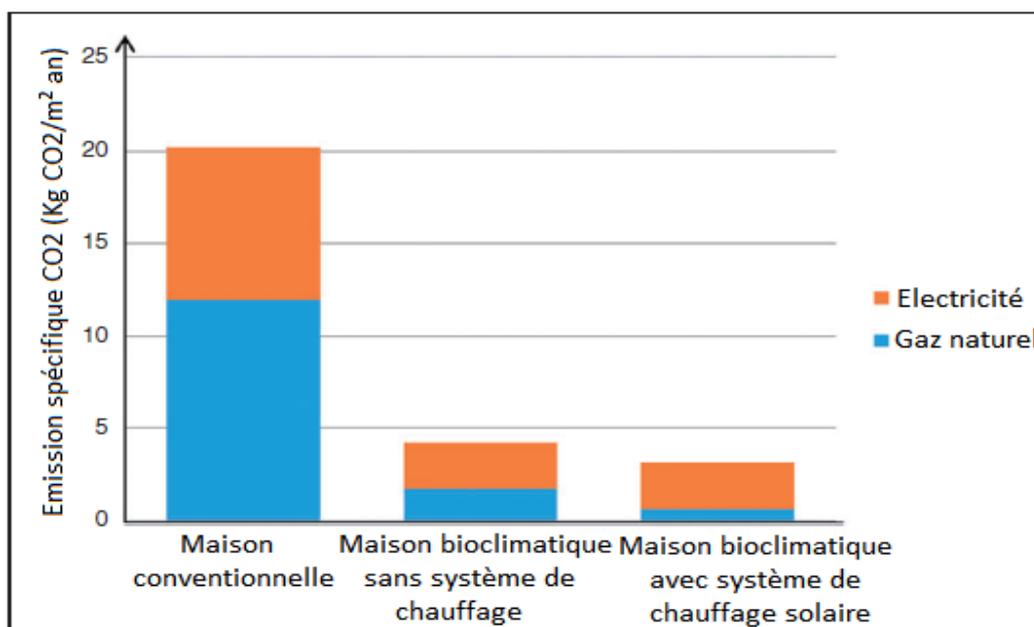


Figure III.18 Bilan environnemental pour la maison bioclimatique et pour la maison conventionnelle

Tableau III.10 Comparaison entre les émissions spécifiques de la maison conventionnelle et la maison bioclimatique avec et sans système de chauffage solaire

| Maison | Energie | Energie consommée (kWh/an) | Facteur d'émission | Emission spécifique CO ₂ (Kg/m ² an) |
|--|-------------|----------------------------|--------------------|--|
| Maison conventionnelle | Electricité | 2957 | 0,65 | 8,209 |
| | Gaz naturel | 10148 | 0,27 | 12,01 |
| Maison bioclimatique sans système de chauffage solaire | Electricité | 861 | 0,65 | 2,502 |
| | Gaz naturel | 1398 | 0,27 | 1,73 |
| Maison bioclimatique avec système de chauffage solaire | Electricité | 861 | 0,65 | 2,502 |
| | Gaz naturel | 451 | 0,27 | 0,63 |

Les émissions de CO₂ de la maison conventionnelle représentent une quantité sept et cinq fois plus grande que ceux de la maison bioclimatique pilote pour l'émission de gaz naturel et d'électricité respectivement. Cette différence majeure entre une maison conventionnelle et une maison bioclimatique pilote

sans système de chauffage solaire est principalement due au choix des matériaux pour la construction et pour l'isolation. En outre, les fenêtres permettant de profiter du soleil et donc de consommer moins d'électricité (pour l'éclairage) pourrait être un élément de choix. Au cours de son cycle de vie, la maison bioclimatique pilote permettrait une réduction significative des impacts environnementaux des émissions de CO₂. (BOUKLI HACENE & CHABANE SARI 2012) font une comparaison entre l'impact environnemental d'une maison écologique et conventionnelle dans la ville de Tlemcen (dans le Nord-Ouest de l'Algérie). Leurs résultats montrent que la maison conventionnelle dégage une quantité d'émissions spécifiques de neuf et sept fois plus importantes que celles dégagées par la maison écologique pour le gaz naturel et l'électricité, respectivement. Ces résultats restent cohérents avec ceux obtenus dans le cadre de cette étude.

Enfin, la différence entre une maison bioclimatique pilote avec et sans système de chauffage solaire est due au choix approprié du système de chauffage. En effet, le système de chauffage solaire est un système qui peut chauffer toute la maison, selon une température homogène dans la maison, ainsi que le réservoir d'eau sanitaire de la maison grâce au solaire thermique.

III.8 Conclusion

Un système de chauffage solaire couplé à une conception bioclimatique a été étudié expérimentalement et numériquement. L'effet de l'inertie thermique, l'orientation, l'isolation thermique et l'utilisation de fenêtres à double vitrage ont été analysés. Les résultats de simulation montrent que, par rapport à une maison conventionnelle, la demande énergétique d'une maison bioclimatique pilote est très faible. En outre, l'augmentation de la taille de la fenêtre de la façade Sud avec un ratio fenêtre-à-mur de 50 %, réduit la demande de chauffage annuel de la maison de 48,70 %. Aussi, la stratégie de ventilation nocturne, associée à l'utilisation de dispositif d'ombrage peut contribuer à réduire la charge de rafraîchissement des bâtiments et d'améliorer le confort thermique des occupants. L'évaluation environnementale a clairement montré

la quantité des émissions de CO₂ émises par une maison conventionnelle et celles émises par une maison bioclimatique pilote. Cette différence est principalement due au choix du matériau pour l'isolation, ce qui conduit à la réduction de la consommation d'énergie pour le chauffage et le rafraîchissement.

(ABBAZ 2013)

ABBAZ D., Optimisation des paramètres de fonctionnement d'un plancher solaire direct (PSD), MEMOIRE de Magister en Physique, Faculté des sciences exactes, Université Constantine 1, 2013.

(ABDALLAH & EL-RAYES 2015)

ABDALLAH M., EL-RAYES K., Optimizing the selection of building upgrade measures to minimize the operational negative environmental impacts of existing buildings, *Build Environ*, Vol. 84, pp. 32-43, 2015.

(ANALYSE-MANAGEMENT)

Analyse de cycle de vie - Management environnemental et éco-produits, ADEME.

<http://www2.ademe.fr/serolet/KBaseShow?sort=-1&cid=96&m=3&catid=13201>

(BADESCU 2011)

BADESCU V., Case study for active solar space heating and domestic hot water preparation in a passive house, *J Renew Sustain Energ*, Vol.3, pp.023102, 2011.

(BERNSTEIN *et al.* 2007)

BERNSTEIN L., BOSCH P., CANZIANI O., Intergovernmental panel on climate change, fourth assessment report, *Climate change, Rapport de synthèse*, Geneva: IPCC, 2007.

(BOUCHLAGHEM 2000)

BOUCHLAGHEM N., Optimizing the design of building envelopes for thermal performance, *Automat Construct*, Vol. 10, pp. 101-112, 2000.

(BOUFFARD 2013)

BOUFFARD É., Conception de bâtiments solaires: méthodes et outils des architectes dans les phases initiales de conception, *Dissertation doctorale*, Université Laval, Canada, 2013.

(BOUKLI HACENE & CHABANE SARI 2012)

BOUKLI HACENE MA., CHABANE SARI NE., Economic, energy and environmental comparison between an ecological and conventional house, *Indoor Built Environ*, Vol. 21, pp. 727-734, 2012.

(CHESNE *et al.* 2012)

CHESNE L., DUFORESTEL T., ROUX J.J., RUSAOUËN G., Energy saving and environmental resources potentials: toward new methods of building design, *Build Environ*, Vol. 58, pp.199-207, 2012.

(CLIMAT 2015)

Climat de la Wilaya d'Alger, Agence urbaine chargée de la Protection et de la Promotion du Littoral Algérois (APPL), Article disponible en ligne. Date de mise à jour: 07-06-2015.

URL: <http://www.appl.dz/spip.php?rubrique31>

(DERRADJI *et al.* 2013)

DERRADJI L., IMESSAD K., MAOUDJ Y., BOUDALI ERREBAI F., AMARA M., Etude des performances énergétiques d'une maison prototype en Algérie, XIème Colloque Interuniversitaire Franco-québécois sur la thermique des systèmes 3-5 Juin, Reims, 2013.

(DTR C3-2 1998)

Document Technique Règlementaire C 3-2, Réglementation thermique des bâtiments d'habitation-Règles de calcul des déperditions calorifiques, CNERIB, Algérie, 1998.

(DTR.C 3-31 1998)

Document Technique Règlementaire C 3-31, Ventilation naturelle des locaux à usage d'habitation, CNERIB, Algérie, 1998.

(DTR.C 3-4 1998)

Document Technique Règlementaire C 3-4, Climatisation-Règles de calcul des apports calorifiques des bâtiments, CNERIB, Algérie, 1998.

(FEZZIOUI *et al.* 2012)

FEZZIOUI N., BENYAMINE M., TADJ N., DRAOUI B., LARBI S., Energy performance of a patio home in the Maghreb context (Algeria, Morocco,

Tunisia and Libya), *Revue des Énergies Renouvelables*, Vol. 15, pp. 399–405, 2012.

(FLORIDES *et al.* 2002)

FLORIDES G.A., TASSOU S.A., KALOGIROU SA, WROBEL L.C., Measures used to lower building energy consumption and their cost effectiveness, *Appl Energy*, Vol. 73, pp. 299–328, 2002.

(FREEWAN 2014)

FREEWAN A., Impact of external shading devices on thermal and day lighting performance of offices in hot climate regions, *Solar Energy*, Vol. 102, pp. 14–30, 2014.

(FRITSCHÉ & SCHMIDT 2004),

FRITSCHÉ UR., SCHMIDT K., Globales Emissions-Model Integrierter Systems (GEMIS), Darmstadt, Allemagne: Institut für Angew and teökologie, eV, 2004.

(GAGO *et al.* 2015)

GAGO E.J., MUNEER T., KNEZ M., KÖSTER H., Natural light controls and guides in buildings: Energy saving for electrical lighting, reduction of cooling load, *Renew Sustain Energ Rev*, Vol. 41, pp. 1–13, 2015.

(GONG *et al.* 2012)

GONG X., AKASHI Y., SUMIYOSHI D., Optimization of passive design measures for residential buildings in different Chinese areas, *Build Environ*, Vol. 58, pp. 46–57, 2012.

(Heschong & Guillaud 1981)

Heschong L., Guillaud H., *Architecture et volupté thermique*, Vol. 1, Edition Parenthèses, 1981.

(IMESSAD *et al.* 2014)

IMESSAD K., DERRADJI L., AIT MESSAOUDENE N., MOKHTARI F., CHENAK A., KHARCHI R., Impact of passive cooling techniques on

energy demand for residential buildings in a Mediterranean climate, *Renew Energy* Vol. 7, pp. 589–597, 2014.

(IMESSAD *et al.* 2015)

IMESSAD K., KHARCHI R., BENSALÉM S., CHENAK A., HAMIDAT A., Etude expérimentale d'un système solaire combiné pour le chauffage par plancher, *Revue des Energies Renouvelables*, Vol. 18, N° 3, pp. 399-405, 2015.

(JOURNAL-OFFICIEL 2004)

Journal officiel de la république Algérienne démocratique populaire, Conventions et accords internationaux-Lois et décrets arrêtés, Décisions, Avis, Communications et annonces, 2004.

(KHARCHI *et al.* 2001)

KHARCHI R., Aït Messaoudène N., Belhamel M., Hamid A., Etude Expérimentale du Comportement Thermique d'un Plancher Solaire Direct, *Revue des Energies Renouvelables : Journées de Thermique*, pp. 115-119, 2001.

(LARTIGUE *et al.* 2014)

LARTIGUE B., LASTERNAS B., LOFTNESS V., Multi-objective optimization of building envelope for energy consumption and daylight, *Indoor Built Environ*, Vol. 23, pp. 70–80, 2014.

(LESKOVAR & PREMROV 2011)

LESKOVAR V.Ž., PREMROV M., An approach in architectural design of energy efficient timber buildings with a focus on the optimal glazing size in the south oriented façade, *Energ Build*, Vol. 43, pp. 3410–3418, 2011.

(METEONORM 2012)

METEONORM software version 7, 2012

(MISSOUM *et al.* 2014)

MISSOUM M., HAMIDAT A., LOUKARFI L., ABDELADIM K., Impact of rural housing energy performance improvement on the energy balance in

the North-West of Algeria, *Energy and Buildings*, Vol. 85, pp. 374–388, 2014.

(MOKHTARI *et al.* 1998)

MOKHTARI A., KAZELOUI H., BOUKEZZI Y., ACHARD, G., Utilisation d'un circuit hydraulique dans un plancher pour le chauffage et le rafraîchissement des locaux, *Revue des Énergies Renouvelables*, Vol. 1, pp. 17–27, 1998.

(MOKHTARI *et al.* 2013)

MOKHTARI F., LOUKARFI L., IMESSAD K., DERRADJI L., KHARCHI R., Experimental study of building envelope insulation performance, International renewable and sustainable energy conference, Ouarzazet, Morocco, 7–9 March 2013.

(MUNARI PROBST *et al.* 2013)

MUNARI PROBST M. C., ROECKER C., FRONTINI F., SCOGNAMIGLIO A., FARKAS K., MATURI L., ZANETTI I. Solar Energy Systems in Architecture-integration criteria and guidelines (N° EPFL-REPORT-197097). Editeurs: Munari Probst, Maria Cristina et Roecker, International Energy Agency Solar Heating and Cooling Programme, 2013.

(NASA)

NASA, URL: <http://eosweb.larc.nasa.gov/sse>

(OLESEN 2002)

OLESEN BW., Radiant floor heating in theory and practice, ASHRAE J, Vol. 44, pp. 19–26, 2002.

(OLGYAY 1953)

OLGYAY V., Bioclimatic approach to architecture, BRAB conference report, National Research Council, Washington DC, Vol. 5, 1953.

(ORAL & YILMAZ 2002)

ORAL G.K., YILMAZ Z., The limit U values for building envelope related to building form in temperate and cold climatic zones, *Build Environ*, Vol.37, pp. 1173–1180, 2002.

(PACHECO *et al.* 2012)

PACHECO R, ORDÓÑEZ J., MARTÍNEZ G., Energy efficient design of building: a review, *Renew Sustain Energ Rev*, Vol. 16, pp. 3559–3573, 2012.

(PACHECO-TORRES *et al.* 2015)

PACHECO-TORRES R., LÓPEZ-Alonso M., MARTÍNEZ G., ORDÓÑEZ J., Efficient design of residential buildings geometry to optimize photovoltaic energy generation and energy demand in a warm Mediterranean climate, *Energy Efficiency*, Vol. 8, pp. 65–84, 2015.

(PEUSER *et al.* 2005)

PEUSER F. A., REMMERS K. H., SCHNAUSS M., Installation solaires thermiques-conception et mise en œuvre, Edité par: Systèmes Solaires, Solar Praxis et le Moniteur, 2005.

(PLANCHER SOLAIRE 2002)

Le plancher solaire direct : un chauffage idéal pour les régions ensoleillées, Fiche réalisée par le GERES et ADEME, 2002.

URL: educ-envir.org/~ecorce/wikini/ecorce/files/guide_methodo_loubatas/fiche2_PSD.pdf

(RHEAULT & BILGEN 1987-A)

RHEAULT S., BILGEN E., On the heat transfer through an automated venetian blind window system. Conférence de ASME/JSME Solar Engineering, pp. 745-755, 1987.

(RHEAULT & BILGEN 1987-B)

RHEAULT S., BILGEN E., Heat transfer optimization of an automated venetian blind window system. Conférence de ASES 12th National Passive Solar, pp. 122-128, 1987.

(ROBERTSON & ATHIENITIS 2010).

Robertson K., Athienitis A., L'énergie solaire pour les bâtiments: Société canadienne d'hypothèques et de logement, 2010.

(RUIZ & MARTINEZ 2010)

RUIZ E., MARTINEZ PJ., Analysis of an open-air swimming pool solar heating system by using an experimentally validated TRNSYS model, *Solar Energy*, Vol. 84, pp. 116–123, 2010.

(SABONNADIÈRE 2006).

SABONNADIÈRE J.C., *Nouvelles technologies de l'énergie tome1: Les énergies renouvelables*, Lavoisier, 2006.

(SFEIR & GUARRACINO 1981)

SFEIR A.A., GUARRACINO G., *Ingénierie des systèmes solaires: applications à l'habitat*. Technique et documentation, Paris, 1981.

(STAMBOULI 2011)

STAMBOULI A.B., *Promotion of renewable energies in Algeria: strategies and perspectives*, *Renew Sustain Energ Rev*, Vol. 15, pp.1169–1181, 2011.

(SZOKOLAY 2004)

SZOKOLAY S., *Introduction to architectural science: the basis of sustainable design*, Elsevier Ltd., London, 2004.

(TZEMPELIKOS & ATHIENITIS 2007)

TZEMPELIKOS A., ATHIENITIS A.K., *The impact of shading design and control on building cooling and lighting demand*, *Solar Energy*, Vol. 81, pp. 369–382, 2007.

(WEISS 2003)

WEISS WW., *Solar heating systems for houses: a design handbook for solar combisystems*, Earthscan, London, 2003.

(ZERVOS *et al.* 2010)

ZERVOS A., LINS C., MUTH J., *RE-thinking 2050: a 100% renewable energy vision for the European Union*, EREC: European Renewable Energy Council, 2010.

Conclusion générale

Le travail entrepris dans le cadre de cette thèse est une contribution à l'évaluation des performances énergétiques et environnementales d'une maison bioclimatique dotée d'un système de chauffage solaire.

Le secteur résidentiel étant le secteur le plus consommateur d'énergie, l'Algérie a lancé plusieurs programmes ambitieux pour améliorer l'efficacité énergétique dans ce secteur. Dans le cadre du projet MED-ENEC en partenariat avec le Centre de Développement des Energies Renouvelables (CDER) et le Centre National d'Etudes et de Recherches Intégrées du Bâtiment (CNERIB), tout en respectant le code algérien sur la construction des bâtiments, une maison pilote, de conception bioclimatique a été construite. Implantée à Souidania (Alger), cette maison à grande inertie thermique a été équipée d'un système de chauffage solaire qui consiste en un plancher solaire direct (PSD) pour le chauffage de l'espace habitable. Grâce à un circuit de dérivation, le système permet également de produire l'eau chaude sanitaire.

Faisant objet de notre étude, cette habitation multi-zones ainsi que son système de chauffage ont été modélisés avec le logiciel TRNSYS. Le modèle a été validé par les mesures expérimentales effectuées sur la maison.

L'analyse des résultats montre que la conjonction de différentes techniques passives de chauffage et de rafraîchissement telles que l'isolation, la masse thermique, les fenêtres, la ventilation nocturne et les dispositifs d'ombrage représentent une stratégie efficace en termes d'économie d'énergie et de confort thermique intérieur. L'analyse de températures internes de la maison bioclimatique montre que l'isolation thermique, la masse thermique importante et l'orientation Sud permettent de réduire la fluctuation de la température interne de cette maison pilote. Afin d'évaluer l'importance des techniques actives pour le chauffage et le rafraîchissement entrepris dans cette maison, a fait ressortir que l'utilisation d'un système PSD couvrira un taux proche des trois quarts de la demande d'énergie pour le chauffage de la maison. Les grandes ouvertures au Sud et la ventilation nocturne naturelle permettent de profiter de l'éclairage naturel, d'optimiser le rafraîchissement passif sans frais

supplémentaires, et procurent une sensation de confort à l'intérieur de la maison. La comparaison des besoins énergétiques de la maison avec ceux d'une maison de construction conventionnelle en Algérie a fait ressortir une économie d'énergie dépassant les 82 %.

Enfin une analyse de l'impact environnemental a montré que les émissions de CO₂ de la maison bioclimatique pilote représentent une quantité sept et cinq fois inférieures à celles issues de la maison conventionnelle pour l'émission de gaz naturel et d'électricité respectivement.

En conséquence, l'utilisation de l'énergie solaire dans le secteur résidentiel n'est plus un choix, mais une question d'urgence pour tenter de stabiliser sa consommation énergétique et de limiter la pénurie de gaz butane, qui est fortement consommé en hiver pour faire face au froid. Ces actions aideront les décideurs à utiliser les énergies renouvelables dans le secteur de la construction et mettront en œuvre des politiques qui permettent la réduction de la consommation d'énergie et l'atténuation des émissions de CO₂ associées aux bâtiments.

Cette étude semble donner de bon résultats. Néanmoins, elle présente quelques limitations qui seront considérées comme perspectives pour d'autres travaux:

- Les infiltrations à travers la maison d'enveloppe et l'ouverture ont été prises comme valeurs constantes dans TRNSYS. Cependant, pour être proches de la réalité, ces infiltrations doivent être calculées en état dynamique en fonction des conditions climatiques extérieures.
- L'effet de l'humidité de l'air intérieur sur le confort thermique dans les différentes zones de la maison n'est pas étudié.
- L'étude expérimentale a été réalisée pendant une courte période (seulement en saison froide). Afin d'obtenir des données raisonnables sur le comportement passif de la maison, l'étude devrait être effectuée pour une plus longue période.
- La simulation n'a pas tenu compte des conditions réelles de logement (nombre d'occupants avec leur métabolisme, éclairage, équipement ménager).
- Le réservoir d'eau chaude doit être dimensionné en fonction des besoins spécifiques des occupants de cette maison.

Les tests de faisabilité de simulation pour ce type de maison, sont encourageants. Cependant, l'analyse coûts-bénéfices et l'analyse du cycle de vie seront considérés comme phase ultérieure dans notre programme de recherche. Il serait aussi intéressant d'effectuer d'autres recherches dans l'utilisation d'autres matériaux dans la composition des parois de la maison (isolation incluse). Aussi, tester ce type de construction pour d'autres types de bâtiments où les profils de consommation d'énergie sont différents (hôpitaux, hôtels, écoles ... etc.) et pour d'autres climats méditerranéen.

Glossaire

ADEME: Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie.

Apports internes: Emission de calories dans l'habitat par les habitants ou leurs activités (machines, éclairage...etc.).

Apports solaire passifs: Consiste à utiliser l'énergie solaire pour l'éclairage naturel, le chauffage des locaux. L'énergie lumineuse du soleil qui pénètre à l'intérieur des pièces par les fenêtres est absorbée par les murs, les planchers et les meubles, puis libérée sous forme de chaleur. Des baies vitrées ainsi que la thermo-circulation permettent de faire diminuer la consommation en d'autres énergies.

Béton: Mélange d'eau, de sable, de ciment, de graviers et d'adjuvants largement utilisé dans la construction pour couler des dalles ou fabriquer des poutrelles, des blocs...Un mur en béton banché est réalisé en coulant du béton entre deux panneaux de coffrage.

Bioclimatisme: Un habitat bioclimatique est un bâtiment dans lequel le chauffage et la climatisation sont réalisés en tirant le meilleur parti du rayonnement solaire et de la circulation naturelle de l'air, en favorisant les apports solaires et en diminuant l'exposition au vent. Cela consiste donc à trouver une adéquation entre l'habitat, le comportement des occupants et le climat, pour réduire au maximum les besoins de chauffer ou de climatiser.

Bouquet énergétique ou **mix énergétique:** définit la répartition des différentes sources d'énergie primaire utilisées pour produire différents types d'énergie. La part de chaque source d'énergie primaire est exprimée en pourcentage.

Capacité installée: terme utilisé pour définir la capacité maximale de production d'électricité de l'ensemble du parc des centrales d'un type donné.

Capacité thermique: C'est la capacité du matériau à emmagasiner la chaleur par rapport à son poids. Elle caractérise la quantité d'énergie à apporter à 1 kg de matériau pour élever sa température de 1°C.

CDER: Centre de Développement des Energies Renouvelables.

Conductivité thermique: la propriété d'un matériau à transmettre la chaleur par conduction. Elle correspond au flux de chaleur qui traverse en un matériau

d'une surface de 1m^2 et de 1m d'épaisseur pour un écart de température de 1°C entre les 2 faces de cette paroi.

Confort hygrothermique: Il est défini comme étant la sensation que ressent une personne par rapport à la température et à l'humidité ambiantes de la pièce où elle se trouve.

CO₂: Gaz carbonique. Lors d'une combustion le Carbone (C) contenu dans les hydrocarbures ou le charbon se combine avec l'oxygène de l'air (O₂) pour donner du gaz carbonique. Le CO₂ est un des principaux responsables de l'effet de serre.

CSTB: Centre scientifique et technique du bâtiment.

Cycle de vie: Le cycle de vie d'un bâtiment est une décomposition en phases de l'intégralité de la vie d'une construction, de sa conception à sa démolition. La fin d'un cycle de vie signifie en général le commencement d'un nouveau cycle de vie. On distingue cinq phases: conception, construction, exploitation, rénovation, destruction.

Densité: Il s'agit de la masse du matériau par unité de volume.

Déperditions thermiques: Les déperditions thermiques désignent les quantités d'énergie qui s'échappent involontairement d'un bâtiment. Ces déperditions se manifestent par une perte de chaleur lorsqu'il fait froid et une perte de fraîcheur lorsqu'il fait chaud.

Déphasage thermique: L'été, le bâtiment accumule la chaleur puis la restitue de manière diffuse à l'intérieur du bâtiment avec un décalage plus ou moins important dans le temps suivant son inertie thermique. Le déphasage représente le décalage de temps entre le pic de température extérieure et le pic de température à l'intérieur du bâtiment. Il est donc considéré comme un atout pour le confort d'été car il retarde le transfert de chaleur aux travers des parois du bâtiment dans la journée.

Diffusivité thermique: C'est la vitesse à laquelle la chaleur se propage par conduction dans un corps. Elle dépend de la capacité du matériau à conduire la chaleur (sa conductivité thermique) et de sa capacité à stocker la chaleur (capacité thermique). Elle est exprimée en mètre carré par seconde (m^2/s).

Eau-eau: Système géothermique prélevant l'énergie dans l'eau de la nappe phréatique, d'un capteur horizontal ou de sondes thermiques et utilisant un chauffage à eau chaude dans la maison.

Économies d'échelle: expression utilisée en économie, pour désigner la diminution du coût moyen de production qui résulte de l'accroissement des quantités produites.

Économie d'énergie: Les économies d'énergie, dont font partie les comportements de sobriété énergétique et d'efficacité énergétique, sont des actions menées afin de limiter la consommation d'énergie ou d'éviter les pertes sur l'énergie produite.

Eco-bilan: Processus d'analyse des impacts environnementaux de la fabrication, utilisation et fin de vie d'un produit donné.

Effusivité thermique: Elle indique la capacité des matériaux à absorber un apport de chaleur. Plus l'effusivité est élevée, plus le matériau absorbe d'énergie sans se réchauffer notablement. Au contraire, plus elle est faible, plus vite le matériau se réchauffe. Elle est exprimée en $(J/m^2 \cdot ^\circ C \cdot s^{-1/2})$.

Énergie finale: Énergie finale regroupe toutes les énergies (gaz, électricité, chauffage urbain..) consommées par l'utilisateur final (particulier, entreprise, collectivité).

Énergie fossile: Le terme d'énergie fossile désigne une énergie obtenue à partir de combustibles fossiles. Un combustible fossile désigne un combustible produit à partir de la fossilisation des végétaux vivants: pétrole, gaz naturel et charbon. Ces combustibles sont présents en quantité limitée et non renouvelables à l'échelle de temps humaine. Ils représentent un stock de carbone à l'état solide enfoui dans la croûte terrestre.

Énergie grise: C'est la quantité d'énergie nécessaire à la production et à la fabrication des produits. Un bilan d'énergie grise additionne l'énergie dépensée du début à la fin du cycle de vie d'un produit: sa conception, l'extraction et le transport des matières premières nécessaires, de la transformation de ces matières premières et la fabrication du produit, de sa commercialisation, de son usage et de son recyclage.

Énergie primaire: Énergie directement puisée dans la nature: pétrole brut, gaz naturel, charbon, rayonnement solaire, biomasse, énergie du vent, énergie hydraulique, fusion de l'uranium...

Énergie renouvelable: Une énergie renouvelable est une énergie renouvelée ou régénérée naturellement. Les énergies renouvelables sont issues de phénomènes naturels, réguliers ou constants. Les énergies renouvelables sont nombreuses: hydroélectricité, éolienne, solaire, géothermie. La lune est à l'origine de l'énergie marémotrice.

Éolienne: Dispositif qui transforme l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique. Le plus souvent cette énergie est elle même transformée en énergie électrique. Les éoliennes produisant de l'électricité sont appelées aérogénérateurs.

Façade double peau: C'est une façade constituée d'une paroi extérieure entièrement vitrée et d'une paroi intérieure plus massive. Cette dernière est composée de parois vitrées et de parois opaques capables d'accumuler la chaleur.

Fluide caloporteur: Corps liquide ou gazeux permettant de transporter et de céder son énergie interne d'un milieu vers un autre milieu.

Gaz à effet de serre: Les gaz à effet de serre (GES) sont des composants gazeux qui contribuent par leurs propriétés physiques à l'effet de serre en empêchant le rayonnement solaire de s'échapper de l'atmosphère (ex: CO₂, méthane...). L'augmentation de leur concentration dans l'atmosphère terrestre est un des principaux facteurs à l'origine du réchauffement climatique.

Gaz naturel: Mélange naturel d'hydrocarbures gazeux, extrait de gisements souterrains et amené par conduites jusqu'au domicile. On l'appelle aussi "gaz de ville" par opposition au gaz en bouteille.

Géothermie: Exploitation de la chaleur naturelle contenue dans l'écorce terrestre grâce à un circuit de capteurs extérieurs enterrés horizontalement ou d'une sonde géothermique verticale. La chaleur est sans cesse renouvelée par le soleil, la pluie et les effets du vent.

Inertie thermique: L'inertie thermique d'un bâtiment est sa capacité à stocker de la chaleur dans ses murs, ses planchers, etc. Plus l'inertie d'un bâtiment est forte; plus il se réchauffe et se refroidit lentement. L'inertie des matériaux d'une maison améliore significativement son confort, et peut générer de l'économie en consommation d'énergie, surtout en demi-saison.

Isolants transparents: C'est des isolants qui ont une résistance thermique élevée et une bonne transmission de la lumière.

ITE: L'isolation thermique extérieur est un procédé d'isolation qui positionne l'isolant coté extérieur à la structure porteuse comme un "manteau thermique" enveloppant le bâtiment. Ce système présente l'avantage d'éliminer la plupart des ponts thermiques à l'exception de ceux relatifs aux balcons. Elle renforce également l'inertie thermique intérieure du bâtiment.

Maison conventionnelle: C'est une maison est construite à base de matériaux de construction courants dans la région ou classiques (parpaings, briques, etc.) et à l'aide de techniques courantes.

Médina: désigne la partie ancienne d'une ville par opposition aux quartiers modernes de type européen. Ce terme est surtout employé dans les pays du Maghreb, en Espagne, en Afrique de l'Ouest et en Afrique de l'Est.

Matériaux classique: C'est des matériaux tels que le parpaing, les briques pleines et les briques creuses. Leur pouvoir isolant est faible. Ils doivent donc obligatoirement être associés à une isolation renforcée, afin d'obtenir une maison bien isolée.

Pare-vapeur: Est un type d'écran souple de protection constitué d'un film s'opposant à la migration de la vapeur d'eau, généralement appliqué sur les surfaces intérieures séparant un espace humide d'un espace où l'on souhaite éviter un phénomène de condensation.

Parti architectural: Le parti architectural d'un édifice définit les dessins techniques et le plan de construction, qui englobent toutes les décisions en matière de conception, qui doivent être examinés et approuvés officiellement avant que les travaux commencent.

Plancher chauffant basse température: Emetteur de chauffage constitué de tubes dans lesquels circule un liquide restituant la chaleur aux pièces à chauffer. Intégré à une chape de béton, il est dimensionné pour que sa surface reste à une température modérée (aux alentours de 23°C). Un plancher chauffant peut assurer le rafraîchissement d'une habitation, on parle alors de plancher chauffant-rafraîchissant.

Plancher Solaire Direct: un type de système solaire combiné qui associe des capteurs solaires thermiques et un plancher chauffant basse température servant à la fois de stockage et d'émetteur de chaleur, sans échangeur intermédiaire.

Ponts thermiques: Ce sont des points de jonction du bâtiment où il y a une rupture totale ou partielle de l'isolation.

Rénovation: Remise à neuf d'un bâtiment existant en tout ou partie sans en changer les caractéristiques (rénovation d'une toiture, d'une peinture).

Régionalisme architectural: Il s'oppose principalement à l'uniformité des constructions qui marquent l'architecture industrielle et entend remettre au goût du jour les styles traditionnels qui font l'identité des régions.

RT 2012: Réglementation Thermique qui s'applique en France aux permis de construire de certains bâtiments tertiaires dès le 28 octobre 2011 et de tous les bâtiments résidentiels à partir du 1^{er} janvier 2013.

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

Ventilation nocturne: Connue beaucoup plus sous son nom en anglais "Night cooling", qui se réfère à l'opération de la ventilation naturelle (sans recours aux systèmes mécaniques) pendant la nuit afin de purger l'excès de chaleur accumulé pendant la journée et de refroidir la structure du bâtiment. Un bâtiment avec une masse thermique optimale, qui peut être exposée à la ventilation nocturne, peut réduire les températures diurnes maximales de 2 à 3 °C en utilisant cette stratégie.