



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

Université Amar Telidji- Laghouat



Faculté : Technologie

Département : Electronique

Laboratoire des semiconducteurs et matériaux fonctionnels

THESE DE DOCTORAT D-LMD

Spécialité : Electronique

Option : Matériaux et énergies renouvelables

Thème

**Exploitation de l'énergie solaire pour la
conception d'un habitat dans un site isolé en
zone semi-aride à Ghardaïa**

Présenté par:

Abdelmadjid BENSABA

Jury de soutenance composé de :

Nom et Prénom	Grade	Domiciliation	Qualité
Mr CHEKNANE Ali	Pr	Université de Laghouat	Président
Mr BEKKOUCHE Sidi Mohammed El Amine	Directeur de recherche	URAER, Ghardaïa	Rapporteur
Mme BENKOUIDER Fatiha	MCB	Université de Laghouat	Co- Rapporteur
Mr TOUAFEK Khaled	Directeur de recherche	URAER, Ghardaïa	Examineur
Mr BENMOUIZA Khalil	MCA	Université de Laghouat	Examineur
Mr BOUARAOUR Kamel	MCA	Université de Ghardaïa	Examineur

Année universitaire: 2020 - 2021

Remerciements

Avant tout je remercie mon grand dieu qui m'a donné la foi, la volonté et la patience pour pouvoir réaliser cette thèse.

Ces travaux ont été réalisés au sein de l'Unité de Recherche Appliquée en Énergies Renouvelables URAER de Ghardaïa en collaboration avec le Laboratoire de Semi-conducteurs et Matériaux Fonctionnels de l'Université Amar Telidji de Laghouat, sous la direction de Monsieur **Sidi Mohammed El Amine BEKKOUCHE** Directeur de Recherche à l'URAER Ghardaïa / EPST CDER Alger. Qu'il veuille trouver ici l'expression de ma profonde et respectueuse gratitude pour avoir guidé mes travaux avec patience et assiduité tout le long de la préparation de cette thèse.

J'exprime ma vive reconnaissance à Madame **Fatiha BENKOUIDER** Maître de Conférences à l'Université Amar Telidji de Laghouat, pour avoir co-encadré ce travail. J'ai apprécié beaucoup ses qualités humaines, la justesse de ses remarques, ses conseils et son esprit d'écoute qui me permettent d'atteindre mes objectifs et d'apprendre énormément.

Je tiens à remercier Monsieur **Ali CHEKNANE**, Professeur à l'Université Amar Telidji et chef d'équipe Matériaux, dispositifs et systèmes photovoltaïques au Laboratoire de Semi-conducteurs et Matériaux Fonctionnels pour l'honneur qu'il me fait en acceptant la présidence du jury.

Je suis très reconnaissant aux Messieurs **Dr Khaled TOUAFEK**, **Dr Khalil BENMOUIZA** et **Dr Kamel BOUARAOUR** d'avoir accepté de faire partie de mes jurys, témoignant ainsi de l'intérêt qu'ils portent à ce travail.

Je souhaite remercier plus particulièrement trois personnes sans qui je ne serais pas arrivée jusqu'au bout de cette aventure: **Dr Abdelouahab BENSEDDIK**, **Dr Hocine BENSAHA** et **Dr Toufik CHERGUI**, je les dis merci à vous.

Mes plus sincères remerciements s'adressent à Mon frère **Khaled BENSAHA** enseignant intermédiaire en langue française pour avoir corrigé les erreurs de la langue de cette thèse. Je lui adresse toute ma reconnaissance.

J'exprime aussi ma gratitude à tous mes amis chercheurs et personnel de soutien de l'Unité de Recherche Appliquée en Energie Renouvelable de Ghardaïa, ceux qui ont participé de près ou de loin à la réalisation du présent travail et à toute l'équipe Architecture Solaire et Bioclimatique.

Enfin, je ne saurais oublier mes parents, mes frères et ma femme pour leurs encouragements combien efficaces et précieux.

Mr Abdelmadjid BENSAHA

Résumé

Les travaux de recherche présentés dans cette thèse se focalisent sur le diagnostic et l'amélioration de l'efficacité énergétique d'une construction énergivore. Pour ce faire, nous avons appliqué des concepts passifs et actifs à une habitation située dans un site isolé, cas de la région de Ghardaïa. L'objectif est de réduire les besoins énergétiques de chauffage et de climatisation pour rendre l'habitat proposé plus économe en énergie. En effet, l'isolation thermique est considérée comme solution efficace et fiable pour améliorer l'efficacité énergétique des bâtiments. En combinant les principaux concepts énergétiques (isolation thermique, chauffage solaire passif, compacité, système PV de 470 Wc, chauffe eau solaire de 200 litres de capacité), il est possible de réduire les besoins énergétiques totaux à 77.4%. L'intégration d'un système photovoltaïque autonome d'une capacité plus élevée (2880 Wc) à ce logement nous a permis d'atteindre une économie d'énergie encore importante qui s'est estimée à 90.03% par rapport à la consommation énergétique d'une maison énergivore. Cependant, nous pouvons avoir mieux si on se base sur un système intelligent et on optimise le débit massique du fluide caloporteur et l'irradiation solaire incidente sur le capteur solaire sous vide.

Mots clés :

Maison énergivore, Concepts passifs et actifs, Maison basse consommation, Isolation thermique, Système photovoltaïque.

Abstract

The research activities presented in this thesis focus on the diagnosis and improvement of the energy efficiency of an energy-intensive house. For this purpose, passive and active concepts were applied to a house located in a remote site in the Ghardaïa region. The aim is to reduce the energy requirements for heating and air conditioning to make this habitat more energy efficient. Indeed, thermal insulation is considered as an effective and reliable solution to improve the energy efficiency of buildings. By combining the main energy concepts (thermal insulation, passive solar heating, compactness, PV system of 470 Wc, solar water heater of 200 liters capacity), it is possible to reduce the total energy needs to 77.4%. A standalone photovoltaic system of 2880 Wc has been integrated, it has enabled us to achieve energy savings of 90.03% compared to the energy use of an energy-intensive house. Therefore, it is more conceivable to be based on an intelligent system and to optimize both the mass flow of the heat transfer fluid and the incident solar radiation on the vacuum solar collector.

Keywords:

Energy-intensive house, Passive and active concepts, Low consumption house, Thermal insulation, Photovoltaic system.

ملخص

تركز الأبحاث المقدمة في هذه الأطروحة على تشخيص وتحسين الفعالية الطاقوية لبناية شرهة للطاقة للقيام بذلك ، قمنا بتطبيق المفاهيم السلبية والفعالة على بناية تقع في منطقة معزولة في ولاية غرداية. الهدف هو تقليل احتياجات الطاقة من التدفئة والتبريد لجعل البناية المقترحة أكثر اقتصادية في استخدام الطاقة. في الواقع ، يعتبر العزل الحراري حلاً فعالاً وموثوقاً لتحسين الفعالية الطاقوية للمباني. من خلال الجمع بين مفاهيم الطاقة الرئيسية (العزل الحراري ، التدفئة الشمسية السلبية ،الاكتناز ، نظام كهروضوئي بسعة 470 واط وسخان المياه بالطاقة الشمسية بسعة 200 لتر) ، من الممكن تقليل إجمالي احتياجات الطاقة إلى % 77.4. مكننا نهج آخر من تحقيق طاقة اقتصادية و التي تقدر بـ % 90.03 مقارنة باستهلاك الطاقة لمنزل شره. في هذه الحالة ، قمنا بدمج نظام كهروضوئي مستقل بسعة أعلى (2880 واط). ومع ذلك ، يمكننا أن نفعل ما هو أفضل إذا اعتمدنا على نظام ذكي وقمنا باختيار مثالي للتدفق الكتلي للسائل الحراري والإشعاع الشمسي الساقط على المجمع الشمسي ذو الأنابيب المفرغة.

الكلمات المفتاحية :

منزل شره للطاقة، مفاهيم سلبية وفعالة، منزل منخفض الاستهلاك، عزل حراري، نظام كهروضوئي.

Sommaire

Sommaire.....	01
Nomenclature.....	04
Table des figures.....	11
Liste des tableaux.....	14
0. Introduction générale.....	17
0.1. Contexte global de la problématique.....	17
0.2. Objectifs et cadre de recherche.....	18
0.3. Plan de la thèse.....	20
Références.....	20
1. Chapitre I: Dispositifs et Concepts Energétiques & Revue Bibliographique	
I.1. Introduction.....	23
I.2. Rayonnement solaire.....	23
I.3. Outils et dispositifs de concepts actifs.....	26
I.3.1. Systèmes de gestion intelligente de l'énergie.....	27
I.3.2. Energie photovoltaïque.....	29
I.3.3. Chauffe-eau solaires.....	35
I.4. Brève description des concepts passifs.....	43
I.4.1. Ajustement du gain solaire & Orientation et avant-toit.	43
I.4.2. Compacité.....	46
I.4.3. Isolations thermiques de l'enveloppe & Compréhension des mécanismes thermo-physiques ...	48
I.5. Conclusion.....	56
Références.....	56
2. Chapitre II: Méthode d'Evaluation et Prise en Compte des Apports Solaires Gratuits	
II.1. Introduction.....	64
II.2. Rayonnement solaire.....	65
II.2.1. Nature du rayonnement solaire.....	65
II.2.2. Constante solaire.....	65
II.2.3. Mesure du rayonnement solaire.....	66
II.3. Paramètres géométriques et atmosphériques.....	68
II.3.1. Paramètres géométriques.....	68
II.3.2. Paramètres atmosphériques.....	70

II.4.	Modèles de calcul de l'éclairement solaire	72
II.4.1.	Approche de Capderou.....	72
II.4.2.	Modèle de Perrin.....	74
II.4.3.	Modèle de R.sun.....	75
II.5.	Performance des modèles de calcul.....	77
II.6.	Apports solaires.....	84
II.6.1.	Méthode de calcul.....	84
II.6.2.	Calcul des irradiations solaires mensuelles moyennes	86
II.6.3.	Influence de l'orientation des baies vitrées.....	87
II.7.	Conclusion.....	90
	Références.....	92
3.	Chapitre III: Les Concepts Passifs et Actifs à l'Egard de l'Efficacité Énergétique	
III.1.	Introduction.....	95
III.2.	Méthode d'évaluation de l'efficacité énergétique.....	96
III.2.1.	Besoins énergétiques dus à l'enveloppe.....	97
III.2.2.	Besoins en eau chaude sanitaire.....	107
III.2.3.	Apports internes liés aux occupants.....	108
III.2.4.	Apports internes liés à l'éclairage et aux ménagers	110
III.2.5.	Consommation (charge) électrique journalière....	110
III.2.6.	Apports solaires.....	111
III.3.	Diagnostic et évaluation des besoins énergétiques "sans aucun concept"	113
III.4.	Intégration des concepts passifs et actifs.....	116
III.4.1.	Apports solaires gratuits.....	116
III.4.2.	Isolation thermique.....	118
III.4.3.	Compacité.....	119
III.4.4.	Chauffage solaire de l'eau.....	120
III.4.5.	Intégration d'un système photovoltaïque bien dimensionné	122
III.4.6.	Couplage de concepts énergétiques et architecturaux	123
III.5.	Conclusion.....	125
	Références.....	126

4.	Chapitre IV: Intégration des Mesures Actives & Système PV et Chauffe-eau Solaire	
IV.1.	Introduction.....	130
IV.2.	Eléments de conception, dimensionnement et optimisation du système photovoltaïque	132
IV.2.1.	Réalisation du système intelligent	132
IV.2.2.	Description du code intégré à la carte Arduino....	134
IV.2.3.	Intégration du "Système intelligent" au système autonome	136
IV.2.4.	Méthode de dimensionnement.....	137
IV.3.	Coût du système photovoltaïque.....	140
IV.4.	Mise en marche et test du système intelligent	141
IV.5.	Performance du système photovoltaïque.....	144
IV.6.	Dimensionnement du système PV et des batteries.....	145
IV.7.	Stockage d'énergie par les batteries solaires.....	147
IV.8.	Application à une habitation.....	148
IV.9.	Expérimentation et amélioration des performances d'un capteur solaire sous vide de type IMEXSol 200L	151
IV.9.1.	Description du banc d'essai.....	151
IV.9.2.	Méthode des surfaces de réponses.....	153
IV.10.	Résultats et discussions.....	157
IV.10.1.	Analyse des surfaces de réponses et interprétation	157
IV.10.2.	Optimisation des paramètres.....	161
IV.11.	Conclusion.....	162
	Références.....	163
5.	Conclusion générale.....	167

Liste des symboles

Chapitre I

- T : période d'oscillation de la température extérieure sur une durée de 24 heures [h]
 ρ : masse volumique [kg/m^3]
 c : capacité thermique massique de la paroi [$\text{J}/\text{kg}/\text{K}$]
 λ : conductivité thermique du matériau [$\text{W}/\text{m}/\text{K}$]
 e : épaisseur de la paroi [m]
 a : diffusivité de la paroi [m^2/s]

Chapitre II

- λ : longueur d'onde électromagnétique [μm]
 T_r : température [K]
 G_{CS} : constante solaire [W/m^2]
 $C_{\text{t-s}}$: correction de la distance terre-soleil
 n : numéro de jour dans l'année
 G_0 : constante solaire corrigée [W/m^2]
 d : déclinaison du soleil [degrés]
 H : angle horaire du soleil [degrés]
 TSV : temps solaire vrai
 TL : temps légal
 DE : décalage de temps
 Et : correction de l'équation de temps
 L : longitude du lieu [degrés]
 t_{lever} : temps de lever de soleil [h]
 t_{coucher} : temps de coucher de soleil [h]
 H_{lever} : angle horaire au lever de soleil [degrés]
 H_{coucher} : angle horaire au coucher de soleil [degrés]
 φ : latitude du lieu [degrés]
 D : durée d'insolation [h]
 h_s : hauteur du soleil [degrés]

δ_s :	azimut du soleil [degrés]
δ_{plan} :	azimut du plan [degrés]
h_{plan} :	hauteur de plan [degrés]
β :	inclinaison du plan [degrés]
i :	angle d'incidence [degrés]
z :	altitude de lieu [km]
T :	facteur de trouble total de Linke
T_1 :	trouble dû à l'absorption gazeuse tant par les constituants fixes de l'atmosphère que par l'ozone et surtout par la vapeur d'eau
T_2 :	trouble correspondant à l'absorption par les gaz de l'atmosphère (O_2 , CO_2 et O_3)
T_3 :	trouble relatif à la diffusion par les aérosols couplés à une légère absorption
m :	masse d'air
P :	correction de l'altitude de lieu
h_0 :	correction de la hauteur du soleil
δ_R :	épaisseur optique de l'atmosphère de Rayleigh
I_{dir} :	éclairement direct incident sur un plan horizontal par ciel clair [W/m^2]
I_{dif} :	éclairement diffus incident sur un plan horizontal par ciel clair [W/m^2]
I_{glob} :	éclairement global reçu sur un plan horizontal [W/m^2]
$I_{\text{dir-inc}}$:	éclairement direct incident sur un plan incliné par ciel clair [W/m^2]
$I_{\text{dif-inc}}$:	éclairement diffus incident sur un plan incliné par ciel clair [W/m^2]
δ'_i :	éclairement diffus rétrodiffusé [W/m^2]
r_0 :	albédo de sol
d_{ciel} :	éclairement diffus incident en provenance du ciel [W/m^2]
δ_d :	composante directe circumsolaire [W/m^2]
δ_i :	composante isotrope correspondant à un ciel de luminance uniforme [W/m^2]
δ_h :	composante diffuse en provenance du cercle de l'horizon [W/m^2]

d_{sol} :	diffus de sol [W/m^2]
$I_{glob-inc}$:	éclairage global reçu sur un plan incliné [W/m^2]
ρ :	albédo de sol défini par le modèle de Perrin
T_n :	facteur de trouble de Linke corrigé
F_d :	fonction de l'altitude solaire
E_{exp} :	angle d'incidence solaire mesuré entre le soleil et une surface inclinée [degrés]
Er_m :	erreur moyenne [W/m^2]
Er_{rm} :	erreur relative moyenne [%]
Er_{qm} :	erreur quadratique moyenne [W/m^2]
Er_{rqm} :	erreur relative quadratique moyenne [%]
$I_{Calculé,i}$:	valeurs du rayonnement solaire calculé [W/m^2]
$I_{Musuré,i}$:	valeurs du rayonnement solaire mesuré [W/m^2]
N :	nombre de données mesurées
R :	coefficient de corrélation
$Q_{solaire}$:	les apports solaires [Wh]
I_j :	irradiation solaire sur une surface unitaire ayant l'orientation j [Wh/m^2]
A_{nj} :	aire réceptrice équivalente ayant l'orientation j [m^2]
A :	aire de la baie [m^2]
F_{Omb} :	facteur de correction de l'ombrage
F_{Red} :	facteur de réduction pour les encadrements des vitrages
g :	facteur solaire de la baie vitrée

Chapitre III

Q_{Tot} :	besoins en chauffage et/ou en refroidissement calculés pour un bâtiment [kWh]
$Q_{Enveloppe}$:	besoins énergétiques dus à l'enveloppe [kWh]
D_j :	nombre de degrés-jours de chauffage ou de refroidissement
$DP_{Enveloppe}$:	somme des déperditions thermiques dues aux murs, fenêtres, portes, plafonds, ponts thermiques, sol, planchers et à la ventilation [W/K]
S_i :	surface [m^2]
b_i :	coefficient de réduction des déperditions thermiques

U_i :	coefficient de transmission thermique par degré de différence entre l'intérieur et l'extérieur [$W/m^2 K$]
R_{si} :	résistance d'échange thermique superficielle intérieure [$m^2 K/W$]
R_i :	résistances thermiques de chaque couche de construction [$m^2 K/W$]
R_{se} :	résistance d'échange thermique superficielle extérieure [$m^2 K/W$]
rv :	résistance supplémentaire des voilages éventuels [$m^2 °C/W$]
r_{rid} :	résistance supplémentaire des rideaux éventuels [$m^2 °C/W$]
r_{occ} :	résistance supplémentaire des occultations [$m^2 °C/W$]
K_i :	Coefficients des vitrages nus des parois vitrées [$W/m^2 °C$]
DP_{Ponts} thermiques :	déperditions thermiques dues aux ponts thermiques [W/K]
l_{pb_i/m_j} :	longueur du pont thermique, plancher bas i - mur j [m]
l_{pi_i/m_j} :	longueur du pont thermique, étage intermédiaire i - mur j [m]
l_{ph_i/m_j} :	longueur du pont thermique, étage supérieur i - mur j [m]
l_{rf_i/m_j} :	longueur du pont thermique, mur de cisaillement i- mur j [m]
h_{Moy_Plaf} :	hauteur moyenne du plafond [m]
N_{appart} :	nombre d'appartements
N_{niv} :	nombre de niveaux
l_{men_i/m_j} :	longueur du pont thermique, charpenterie i - mur j [m]
k :	conductivité thermique [$W/m K$]
DP_{Ventil} :	déperditions thermiques dues au système de ventilation par degré de différence en température entre l'intérieur et l'extérieur [W/K]
qv_{en} :	débit d'air équivalent transitant dans le logement [m^3/h]
qv_{Fen_H} :	débit d'air d'aération quand les fenêtres sont utilisées comme système de ventilation d'hygiène [m^3/h]
D_{Hyg}	débit d'hygiène [m^3/h]
qv_{Fen_S}	débit supplémentaire dans le cas où l'ouverture des fenêtres vient en complément du système spécifique (aspect comportemental de l'occupant) [m^3/h]
Sp :	surface de la pièce [m^2]

qV_{Comb} :	débit supplémentaire extrait lié au fonctionnement des appareils à combustion quand ils se trouvent dans les pièces chauffées [m^3/h]
P_{Chauf} :	puissance fournie par le système de chauffage [W/m^2]
H_T :	coefficient de déperdition par transmission [$\text{W}/\text{m}^2 \text{K}$]
H_V :	coefficient de déperdition par renouvellement d'air [$\text{W}/\text{m}^2 \text{K}$]
ΔT :	différence entre la température de la pièce et celle de base [K]
qV_{vmc} :	débit d'air extrait par la ventilation mécanique [m^3/h]
C_d :	coefficient de dépassement
C_{fr} :	coefficient de fuite du réseau
qV_{perm} :	débit de fuite de l'enveloppe [m^3/h]
C_{perm} :	perméabilité de l'enveloppe [m^3/h]
A_T :	surface intérieure totale des parois qui séparent le volume chauffé de l'extérieur, du sol et des locaux non chauffés [m^2]
qV_{condext} :	débit d'air extrait par les conduits à tirage naturel [m^3/h]
Q_{ECS} :	énergie nécessaire à la production de l'eau chaude sanitaire pour la journée [Wh]
ρ :	masse volumique de l'eau en fonction de sa température [Kg/litre]
V_{ECS} :	volume d'eau [litres]
N_{Pers} :	nombre de personnes occupant le logement
$A_{\text{Bât}}$:	surface habitable du logement [m^2]
T_{ECS} :	température de l'eau chaude au point de soutirage [$^{\circ}\text{C}$]
T_{ef} :	température moyenne de l'eau froide du mois considéré entrant dans le ballon ou le serpentin de production d'eau chaude sanitaire (production instantanée) [$^{\circ}\text{C}$]
Q_{occup} :	apports internes dus aux occupants [kWh]
C_p :	chaleur dégagée par occupant [W/occupant]
$D_{\text{pres/jour}}$:	durée de présence par jour [h/jour]
N_{Jch} :	nombre de jours chauffés [jours/an]
I_j :	irradiation solaire sur une surface unitaire ayant l'orientation j [Wh/m^2]
A_{nj} :	aire réceptrice équivalente de la surface ayant l'orientation j [m^2]
F_{Omb_R} :	facteur d'ombre des rideaux

F_{Omb_S} :	facteur d'ombre de la surface
F_{Cor_h} :	facteur de correction pour l'horizon
F_{Cor_Sur} :	facteur de correction pour les surplombs
F_{Cor_Ecr} :	facteur de correction pour les écrans latéraux
T_{Conf} :	température de confort [°C]
T_{ext} :	température ambiante extérieur [°C]
X :	économie en énergie apportée par les gains internes générés par les activités des occupants, l'éclairage et les équipements électriques [%]
Q_{Elc} :	apports internes dus aux équipements électriques [kWh]
Q_{Cons_Elc} :	consommation électrique mensuelle [kWh]

Chapitre IV

E_{Charge} :	consommation d'énergie quotidienne [Wh]
$P_{Générateur-PV}$:	puissance crête du générateur photovoltaïque [W_c]
$N_{Modules-PV}$:	nombre de modules photovoltaïques
D_{Ins} :	durée d'insolation ou le nombre d'heures d'ensoleillement [h]
$U_{Tension_système}$:	tension du système photovoltaïque [V]
U_n :	tension nominale du module [V]
$N_{ModulesPV_série}$:	nombre de modules photovoltaïques en série
$N_{ModulesPV_parallèle}$:	nombre de modules photovoltaïques en parallèle
$C_{Stockage}$:	capacité du stockage des batteries [Ah]
$n_{Jours_autonomie}$:	nombre de jours d'autonomie
$P_{Profondeur_décharge}$:	profondeur de décharge des batteries
$N_{Batteries}$:	nombre de batteries
$C_{Capacité_batterie}$:	capacité d'une seule batterie [Ah]
$I_{Régulateur}$:	courant maximal produit par les modules PV [A]
$P_{Onduleur}$:	puissance de sortie de l'onduleur [W]
$C_{Coût-régulateur}$:	coût du régulateur de charge [DA]
$\gamma_{Coût-A}$:	coût unitaire du courant du régulateur de charge [DA]
$C_{Coût-onduleur}$:	coût de l'onduleur [DA]
$\delta_{Coût-W}$:	coût unitaire de la puissance de l'onduleur [DA]
$C_{Coût_système_intelligent}$:	coût du système intelligent [DA]

$C_{\text{Coût_arduino}}$:	coût de la carte arduino [DA]
$C_{\text{Coût_Cap_lumière}}$:	coût du capteur de lumière [DA]
$C_{\text{Coût_Cap_mouvement}}$:	coût du capteur de mouvement [DA]
$C_{\text{Coût_Cap_température}}$:	coût du capteur de température [DA]
C_{Relai} :	coût du relais électromécanique [DA]
$E_{\text{Générateur-PV}}$:	énergie photovoltaïque produite [Wh]
$A_{\text{Générateur-PV}}$:	surface totale du générateur photovoltaïque [m ²]
E_{Soleil} :	énergie solaire reçue par unité de surface [Wh/m ²]
$\eta_{\text{Générateur-PV}}$:	rendement du générateur photovoltaïque
$\eta_{\text{Générateur-PV_réf}}$:	rendement du générateur photovoltaïque référence
β :	coefficient de température négative de (de la puissance) la cellule donnée par le fabricant
T_{cell} :	température de la cellule calculée pour chaque jour [°C]
T_{Ambiante} :	température ambiante journalière moyenne [°C]
G :	éclairage solaire moyen par jour [W/m ²]
$\eta_{\text{Batteries}}$:	rendement de la batterie
$\eta_{\text{bat_self_dsc}}$:	taux quotidien d'autodécharge de la batterie solaire
$E_{\text{Batteries_charge}}$:	énergie stockée dans les batteries durant la période de charge [Wh]
$E_{\text{Batteries_décharge}}$:	énergie stockée dans les batteries durant la période de décharge [Wh]
$E_{\text{Batteries_min}}$:	niveau d'énergie minimal [Wh]
$E_{\text{Batteries_max}}$:	niveau d'énergie maximal [Wh]

Table des figures

Chapitre I

- Figure I.1 : Schéma de principe de l'échangeur air-sol
- Figure I.2 : Géométrie et schéma descriptif de l'échangeur air-sol
- Figure I.3 : Principes de fonctionnement d'un Smart System
- Figure I.4 : Exemple de système de stockage d'énergie par batteries (BESS) dans un système autonome
- Figure I.5 : Structure du modèle spectral développé
- Figure I.6 : Organigramme de la méthode proposée
- Figure I.7 : Banc d'essai expérimental et son schéma synoptique
- Figure I.8 : Schéma synoptique du système expérimental
- Figure I.9 : Description de l'installation expérimentale
- Figure I.10 : Coupes transversales des tubes sous vide: avec (à gauche) et sans (à droite) ailettes d'absorbeur
- Figure I.11 : Coupe transversale d'un tube sous vide caloduc
- Figure I.12 : Pertes optiques et coupe transversale d'un tube sous vide de forme U
- Figure I.13 : Banc d'essai expérimental
- Figure I.14 : Le schéma du capteur solaire à tubes sous vide avec caloduc coaxial
- Figure I.15 : L'intégration d'un auvent sur une façade coté sud
- Figure I.16 : Différence entre les ouvertures latérales et zénithales
- Figure I.17 : Plans descriptifs 2D et 3D du studio pour différents types d'exposition (totale, mitoyenne et partielle)
- Figure I.18 : Représentation illustrative du premier matériau
- Figure I.19 : Représentation illustrative du deuxième matériau

Chapitre II

- Figure II.1 : La station radiométrique de l'Unité de Recherche Appliquée en Energie Renouvelable URAER-Ghardaïa
- Figure II.2 : Comparaison entre les différents éclaircissements globaux horizontaux : mesurés (en noir) et ceux calculés par les approches de Perrin (en rouge), Capderou (en vert), et R.sun (en bleu)
- Figure II.3 : Diagramme de dispersion avec droite de régression, l'éclaircissement solaire global horizontal correspondant à la meilleure approche

- Figure II.4 : Comparaison entre les différents éclairagements inclinés à 32° sud : mesurés (en noir) et ceux calculés par les approches de Perrin (en rouge), Capderou (en vert), et R.sun (en bleu)
- Figure II.5 : Diagramme de dispersion avec droite de régression, l'éclairément solaire global incliné à 32° sud : approche de Perrin
- Figure II.6 : Plan descriptif 2D et concept de chauffage passif
- Figure II.7 : Dimensions des ouvertures, en cm: (a) Porte fenêtre P1, (b) Porte opaque d'entrée P2, (c) Fenêtre type 1, (d) Fenêtre type 2
- Figure II.8 : Variation du gain solaire mensuel (journalier moyen)

Chapitre III

- Figure III.1 : Répartition des besoins énergétiques, cas d'une maison énergivore
- Figure III.2 : Besoins énergétiques mensuels de chauffage, l'effet des apports solaires
- Figure III.3 : Besoins énergétiques mensuels, l'effet de l'isolation thermique
- Figure III.4 : Besoins énergétiques mensuels, l'effet de la compacité
- Figure III.5 : Besoins énergétiques mensuels, l'effet de l'intégration d'un chauffe-eau solaire
- Figure III.6 : Besoins énergétiques mensuels, l'effet de l'intégration d'un système photovoltaïque dimensionné
- Figure III.7 : Réduction des besoins énergétiques annuels suite à l'introduction d'un seul concept
- Figure III.8 : Besoins énergétiques mensuels, intégration et combinaison des concepts énergétiques
- Figure III.9 : Répartition des besoins énergétiques, comparaison entre une maison énergivore et une maison économe en énergie

Chapitre IV

- Figure IV.1 : Système d'étiquettes énergétiques pour les bâtiments
- Figure IV.2 : Composants du système intelligent
- Figure IV.3 : Image descriptive du système réalisé
- Figure IV.4 : Interface du code intégré à la carte Arduino
- Figure IV.5 : Intégration du système intelligent au Système PV autonome

- Figure IV.6 : Algorithme d'optimisation du nombre de modules photovoltaïques
- Figure IV.7 : Algorithme d'optimisation de la banque de batteries
- Figure IV.8 : Fonctionnement et description du scénario d'occupation issus de l'application conçue (exemple indicatif)
- Figure IV.9 : Besoins énergétiques mensuels, intégration des concepts passifs et actifs avec un système photovoltaïque de 2880 Wc
- Figure IV.10 : Réglementation thermique et évolutions successives
- Figure IV.11 : Images descriptives du banc d'essai
- Figure IV.12 : Corrélation linéaire entre les réponses calculées et mesurées du système
- Figure IV.13 : Surfaces de réponses
- Figure IV.14 : Courbes isoplèthes

Liste des tableaux

Chapitre I

Tableaux I.1 : Proposition du profil de charge optimisé

Tableaux I.2 : Comparatif global des isolants

Chapitre II

Tableaux II.1 : Valeurs retenues des paramètres décrivant l'état de l'atmosphère

Tableaux II.2 : Incertitudes et calculs d'erreurs commises sur les éclairements globaux horizontaux (du lever au coucher du soleil)

Tableaux II.3 : Incertitudes et calculs d'erreurs commises sur les éclairements globaux inclinés à 32° sud (du lever au coucher du soleil)

Tableaux II.4 : Facteurs d'ombrage pour les différentes orientations

Tableaux II.5 : Facteurs solaires pour les types de vitrages les plus courants

Tableaux II.6 : Irradiations solaires mensuelles (journalières moyennes) incidentes sur un capteur vertical, exprimées en Wh/m², cas d'un ciel totalement clair

Chapitre III

Tableaux III.1 : Coefficient de réduction des déperditions bi pour une paroi i (vitrée ou/et opaque) en fonction du rapport des surfaces S_{Inc-Ic} / S_{Inc-Ex} et du coefficient surfacique équivalent U

Tableaux III.2 : Valeurs retenues des résistances thermiques superficielles

Tableaux III.3 : Coefficients des vitrages nus K_i des parois vitrées

Tableaux III.4 : Composition de la maçonnerie et propriétés des matériaux de construction de notre habitat

Tableaux III.5 : Valeurs retenues du coefficient de déperdition par transmission du bâti $U_{bât}$

Tableaux III.6 : Valeur de perméabilité

Tableaux III.7 : Diffusion de chaleur par personne

Tableaux III.8 : Diffusion de chaleur générée par éclairage et équipements (étude de cas)

Tableaux III.9 :	Consommation moyenne de l'éclairage et des appareils électroménagers par jour (étude de cas)
Tableaux III.10 :	Facteurs solaires pour les deux types de vitrages les plus courants
Tableaux III.11 :	Consommation énergétique mensuelle et annuelle requise pour maintenir une température du confort T_{Conf}
Tableaux III.12 :	Valeurs mensuelles et annuelles des gains solaires journaliers moyens $Q_{Solaire}$ par unité de surface (kWh/m^2)

Chapitre IV

Tableaux IV.1 :	Relevé des énergies consommées d'une charge composée de lampes, d'un climatiseur et d'un ventilateur
Tableaux IV.2 :	Optimisation du coût, enchaînement et schéma de connexion des batteries solaires
Tableaux IV.3 :	Optimisation du coût, enchaînement et schéma de connexion des modules photovoltaïques
Tableaux IV.4 :	Calcul des énergies stockées dans la banque de batteries
Tableaux IV.5 :	Valeurs mensuelles calculées de l'énergie PV produite
Tableaux IV.6 :	Niveaux des variables utilisées pour la conception spécifiée par l'utilisateur
Tableaux IV.7 :	Conditions et résultats de conception expérimentale, basés sur le plan de conception spécifiée par l'utilisateur à cinq niveaux
Tableaux IV.8 :	Analyse de variance "ANOVA", termes linéaires, d'interactions et quadratiques pour la réponse y_1 et coefficients de modèle de prédiction
Tableaux IV.9 :	Analyse de variance "ANOVA", termes linéaires, d'interactions et quadratiques pour la réponse y_2 et coefficients de modèle de prédiction
Tableaux IV.10 :	Niveaux des variables utilisées en appliquant la méthode des surfaces de réponses

Introduction Générale

Introduction générale

0.1. Contexte global de la problématique

A l'échelle mondiale, la protection de l'environnement passe par l'économie d'énergie qui est une source abondante et gratuite. L'Algérie occupe une situation géographique stratégique qui favorise le développement et l'utilisation des énergies renouvelables, plus particulièrement l'énergie solaire. Une grande importance a été accordée aux énergies renouvelables en vue de conserver nos ressources naturelles et se débarrasser de la dépendance de l'énergie fossile [1].

Le modèle actuel de consommation énergétique en Algérie repose généralement sur une très faible efficacité énergétique, un gaspillage important et inquiétant du fait du coût des énergies [2], et une très faible production énergétique à base renouvelable (inférieure à 1%) [3].

Face à cette situation, la stratégie nationale est motivée par l'immense potentiel en énergie solaire qui, selon les prévisions, devrait atteindre d'ici 2030 plus de 37% de la production nationale d'électricité [4].

Selon des chiffres récents, l'Algérie reçoit près de 3000 heures d'ensoleillement par an et une irradiation variant entre 4 et 7 kWh/m²/jour [5].

Notre pays vise une intégration progressive de l'énergie renouvelable comme source de production d'énergie en :

- Créant des centres de formation en énergies renouvelables [1],
- Créant le commissariat national aux énergies renouvelables et à l'efficacité énergétique [1, 6],
- Créant des centrales photovoltaïques à travers le territoire national,
- Effectuant une vaste sensibilisation sur l'importance de l'énergie renouvelable à toutes les catégories [1].

Ces organismes vont assurer un soutien aux parties prenantes institutionnelles et économiques.

D'autre part, selon l'Agence Nationale pour la Promotion et la Rationalisation de l'Utilisation de l'Energie l' "APRUE" [7], le secteur résidentiel est à l'origine de 35% de la consommation d'énergie finale en Algérie. Pour faire face, un programme "ECO-BAT" a été mis en place ayant pour objectif principal l'amélioration du confort thermique et la réduction de la consommation énergétique (chauffage et climatisation) dans les logements [7].

0.2. Objectifs et cadre de recherche

Dans le cadre de cette recherche, nous nous intéressons à une région saharienne qui est une zone aride, marquée par des conditions favorisant l'utilisation de l'énergie solaire, notamment pour les besoins des habitants dans les sites isolés. Le régime climatique semi-aride est caractérisé par un été chaud et sec et un hiver très froid (notamment la nuit par rapport au jour) avec des précipitations rares et irrégulières. Le confort est donc loin d'être atteint.

Sous ces conditions, les éléments de conceptions bioclimatiques passives et actives permettent en même temps d'accroître le confort et de réduire les consommations d'énergie de chauffage et/ou de rafraîchissement. Ces éléments architecturaux sont généralement bénéfiques pour l'environnement vu qu'ils favorisent la diminution des émissions de polluants.

La consommation énergétique due au secteur du bâtiment devra être réduite puisqu'il génère plus de la moitié de nos émissions de CO₂. Aujourd'hui, le savoir-faire acquis permet de construire des résidences confortables, saines et économes en énergie. Les labels énergétiques peuvent contribuer significativement à améliorer l'efficacité énergétique. Le travail doit se faire à travers le calcul des principaux paramètres du confort et les besoins énergétiques annuels et mensuels selon les propriétés thermo-physiques de l'enveloppe, le lieu de la zone climatique,

la surface des baies vitrées et leurs répartitions sur les différentes orientations. Une réflexion approfondie sera menée pour l'intégration des différentes stratégies (passives et actives) de conception architecturale y compris les constructions isolées loin du réseau électrique et non connectées au gaz naturel. Nous cherchons à définir en fonction du climat les concepts architecturaux et l'énergie utile du bâti.

L'importance de cette recherche est liée directement aux bâtiments et à la quantification de leurs besoins en énergie pour le chauffage et/ou le refroidissement. Ces constructions possèdent l'avantage d'être plus respectueuses à l'environnement et elles offrent un maximum de confort thermique en été comme en hiver.

Par l'application de ces stratégies dans ce secteur, l'économie du pays va diminuer forcément sa dépendance à l'énergie. Les démarches qui seront menées nous permettent :

- d'avoir des bilans énergétiques, tenant compte des occupants et de leurs exigences,
- de favoriser une diminution des besoins en énergie,
- d'assurer un bon confort,
- une bonne isolation thermique,
- une meilleure utilisation des gains solaires passifs en hiver,
- une réduction et une maîtrise de la consommation énergétique,
- de respecter les critères environnementaux et,
- d'identifier les méthodes les plus efficaces pour économiser l'énergie consommée.

L'objectif général est de rendre une bâtisse plus rationnelle en énergie, fonctionnelle et plus confortable. Nous allons essayer d'anticiper et d'appréhender sereinement les contraintes du confort qui doivent à la fois tenir compte du régime climatique de la région à étudier et intégrer des principaux concepts passifs et actifs pour concevoir un habitat durable à basse consommation d'énergie. Cette contribution est consacrée à la réduction de la consommation d'énergie, l'amélioration de l'efficacité

énergétique et l'augmentation de la part des énergies renouvelables consommées.

0.3. Plan de la thèse

Après une introduction générale qui définit le contexte global de la problématique posée ainsi que les objectifs visés, le manuscrit s'organise autour de quatre chapitres.

- Le premier chapitre a permis, à travers un large état d'art, une synthèse sur les systèmes et les concepts énergétiques.
- Le deuxième chapitre a été consacré à l'étude du rayonnement solaire et les apports solaires dans notre région d'étude.
- Le troisième chapitre propose un choix judicieux d'une démarche de conception bioclimatique, favorisant des économies d'énergies importantes et permettant une réduction des charges de chauffage et de climatisation par l'intégration des différents concepts énergétiques. L'objectif est de minimiser le maximum la consommation énergétique globale mensuelle et annuelle.
- Nous nous intéressons dans le quatrième chapitre à renforcer la capacité d'un système photovoltaïque et optimiser les paramètres du fonctionnement issus d'une étude expérimentale d'un chauffe-eau solaire de type sous vide. Nous proposons certaines démarches pour améliorer en plus l'efficacité énergétique de l'habitat.

Finalement, une conclusion générale clôturera notre thèse.

Références

1. A. Smai, M.L. Zahi, Les potentialités de l'Algérie en énergies renouvelables, Recherches économiques et managériale N° 91, Université Mohamed Khider, Biskra, Juin 2016.
2. F.Z.I. Erroukma, M. Bougeroua, N. Ghania, Les stratégies nationales et internationales déployées par l'Algérie dans les énergies renouvelables, Conférence internationale sur les récentes tendances du commerce international et les défis du développement durable Du 02 au 03 décembre 2019, Université Hamma Lakhdar d'El Oued.

3. A. Attar, L'Algérie face aux grands défis énergétiques du 3^{ème} millénaire, 1^{er} Colloque International sur Hydrocarbures, Energies et Environnement, Page 52, 17 Novembre 2014, Université Kasdi Merbah d'Orangla.
4. H. Saidi, Energies Renouvelables, Polycopié de cours 1^{ère} année Master électrotechnique, Année universitaire 2016 / 2017.
5. A. Kouadri Boudjelthia, Energies Renouvelables: un moteur principal du développement durable en Algérie, Salon national de valorisation des Programmes Nationaux de Recherche, Oran le 09 avril 2014.
6. La création du commissariat national aux énergies renouvelables et à l'efficacité énergétique,
Site web: <https://www.energy.gov.dz/?article=la-creation-du-commissariat-national-aux-energies-renouvelables-et-a-l%27efficacite-energetique>, accessible octobre 2020.
7. Programme ECO-BAT, Efficacité énergétique dans le bâtiment, Contexte et Objectifs, site web: <http://www.aprue.org.dz/prg-eco-bat.html>, accessible octobre 2020.

Chapitre I

Dispositifs et Concepts

Energétiques

Revue Bibliographique

Chapitre I :

Dispositifs et Concepts Energétiques

Revue Bibliographique

I.1. Introduction

Durant ces dernières années, la consommation énergétique en Algérie est en forte progression, notamment dans le secteur résidentiel, à cause de la croissance démographique élevée, l'amélioration du niveau de vie, et le phénomène de l'urbanisation qui est de plus en plus important [1].

Un habitat durable respecte l'environnement car il ne consomme pas beaucoup d'énergie et émette moins de gaz à effet de serre (CO₂), ce qui a incité une diminution conséquente.

Ce chapitre constitue une revue bibliographique sur des concepts passifs et actifs appliqués aux résidences familiales à fin d'approfondir les connaissances et permettre une meilleure compréhension des problématiques. Cette revue s'organise autour de trois parties importantes :

Au début, nous présentons une brève recherche sur des travaux liés au rayonnement solaire, en prenant en considération les différents modèles d'estimation. On s'est intéressé ensuite à une revue des concepts actifs: l'intégration de l'énergie photovoltaïque, dimensionnement et optimisation des chauffe-eaux solaires. Les concepts passifs et l'efficacité énergétique qui en découle seront présentés à la fin du chapitre.

I.2. Rayonnement solaire

L'estimation du rayonnement solaire global est essentielle pour l'utilisation de l'énergie solaire. Plusieurs travaux sont disponibles dans la littérature, traitant ainsi l'évaluation et la comparaison entre les différents modèles empiriques.

En 2009, Yettou et al. [2] ont proposé une étude comparative entre deux modèles d'estimation du rayonnement solaire (R-sun et Capderou) en deux sites Algériens (Bouzaréah et Ghardaïa). Cette étude a montré

que le modèle de R.sun présente une meilleure estimation de composantes directes et diffuses, cas d'un plan incliné. Ils ont constaté que le modèle de Capderou peut conduire à des valeurs erronées. Une année après, Yaïche et al. [3] ont pu développer un programme de calcul de rayonnements sous EXCEL pour 48 wilayas d'Algérie. Les interfaces conçus génèrent un nombre important de données calculées. Elles concernent particulièrement les irradiations diffuses, directes et globales incidentes sur un plan d'orientation et d'inclinaison quelconques.

L'article de Gairaa et al. [4], publié en 2011, apporte des informations utiles qui peuvent aider les concepteurs et les utilisateurs à évaluer le potentiel solaire du site de Ghardaïa. Ils ont montré qu'il existe une variation évidente de l'activité du rayonnement solaire entre les quatre saisons, hiver, printemps, automne et été. De ce fait, ils ont conseillé les concepteurs de suivre leurs systèmes sur une base de suivi saisonnier; cela réduira le coût élevé du suivi instantané. Les auteurs ont annoncé que les valeurs annuelles des indices de clarté et de diffusion sont estimées respectivement à 0.68 et 0.37. Ces résultats reflètent, en conséquence, la clarté du ciel tout au long de l'année. La moyenne journalière mensuelle record du rayonnement solaire global estivale est estimée à 7762 Wh/m². Le minimum est enregistré en hiver (3915 Wh/m²). Compte tenu du flux rayonnant diffus, les mesures ont montré que la moyenne mensuelle journalière s'est rapprochée à 1173 Wh/m² en hiver et à 2829 Wh/m² en été.

Une année après, Mesri et al. [5] ont pu étendre quelques modèles théoriques d'estimation du rayonnement solaire global horizontale. Ils ont testé les modèles de Lacis & Hansen, Bird & Hulstrom, Atwater & Ball et celui de Davies & Hay appliqués aux sites de Ghardaïa et Bouzaréah. Les résultats obtenus par simulation ont montré que les modèles de Davies & Hay, et celui de Bird & Hulstrom permettent d'obtenir des meilleures estimations des composants solaires pour les deux sites.

En 2014, Dai et al. [6] ont proposé un modèle précis pour la prédiction des composants solaires directs et diffus sous un ciel clair à

différentes altitudes. Le coefficient de détermination R^2 obtenu s'est rapproché du 0.99 pour le direct et 0.86 pour le diffus. La précision de ce nouveau modèle semble plus remarquable par rapport à celle des meilleurs modèles existants.

Un autre travail, accompli par Boukelia et al. [7], a permis d'étudier dix modèles empiriques en corrélant la moyenne journalière mensuelle diffuse en faveur de six régions Algériennes (Alger, Constantine, Ghardaïa, Bechar, Adrar et Tamanrasset). L'identification des équations quadratiques et cubiques issues des données du rayonnement solaire global, a donné une meilleure précision, et a permis d'ouvrir par la suite des pistes de recherche. Les modèles de régression testés peuvent être utilisés pour des modèles généralisés appliqués à tous les sites Algériens.

Le travail mené par Boukelia et al. [8], a permis de proposer un nouveau modèle de prédiction des composants solaires direct, diffus et global pour un ciel clair. L'étude comparative avec le modèle proposé a montré qu'elle est favorable pour l'estimation du rayonnement solaire incident durant l'année et à n'importe quel jour. Ils se sont basés sur les données mesurées collectées au laboratoire énergétique de la faculté des sciences de la ville de Tétouan (35.57 latitude, 5.37 longitude) au nord du Maroc.

Par ailleurs, une revue se référant à 90 articles s'est achevée par le travail de Teke et al. [9]. Ils ont pu examiner plusieurs propositions intéressantes. Elles sont traduites par des modèles linéaires et non linéaires, les modèles d'intelligence artificielle et les modèles de la logique floue. Les études statistiques ont montré que les modèles non linéaires sont des modèles plus précis.

Récemment, après une année, les modèles de Ghouard, Perrin Brichambaut, Bird-Hulstrom et Capderou ont été testés pour le calcul des irradiances solaires journalières, diffuses et globales. Les données mesurées correspondent à des conditions météorologiques spécifiques à la ville de Tétouan. Les résultats ont prouvé que les modèles de Ghouard et Bird-Hulstrom sont moins précis par rapport aux autres si nous voulons

estimer le rayonnement diffus en période hivernale. Cependant, les modèles de Bird-Hulstrom et Capderou sont moins précis pour l'estimation du global en période estivale. Un bon accord a été soulevé entre les modèles de prédiction et les résultats calculés du rayonnement solaire global, en particulier les modèles de Ghouard et Perrin Brichambaut [10].

I.3. Outils et dispositifs de concepts actifs

Les concepts actifs sont des systèmes qui exploitent les ressources énergétiques inépuisables, c'est-à-dire des énergies renouvelables. Les plus connues sont l'énergie solaire, éolienne et thermique, mais il en existe d'autres types comme la biomasse, l'énergie géothermique, hydraulique ou marémotrice. Elles sont également appelées des énergies alternatives.

L'architecture solaire dite "active" met en œuvre des équipements qui captent, stockent et distribuent de l'énergie naturelle pour les besoins des habitants d'une maison, notamment pour le chauffage, l'eau chaude sanitaire mais aussi pour la fourniture de l'électricité.

Le travail de recherche présenté par Saifi [11] propose des solutions d'intégrations bioclimatiques telles que l'échangeur air-sol, la cheminée solaire (figures I.1 et I.2) et les murs végétalisés pour deux archétypes choisis dans deux zones arides "Ouargla et Béchar". L'intégration d'un système de cheminée solaire assure la ventilation naturelle dans les bâtiments, il permet de réduire la consommation énergétique de l'ordre de 8.46 %. En effet, l'intérêt d'un échangeur air-sol est majeur, puisqu'il améliore tout au long de l'année les conditions thermiques. Qu'il soit utilisé en mode réchauffement en hiver ou refroidissement en été, il intervient de manière efficace vu qu'il amortit les amplitudes thermiques. Tenant compte des conditions climatiques d'Ouargla, l'échangeur air-sol a révélé une diminution très importante en termes de consommation énergétique. Ce système a permis de diminuer la consommation énergétique annuelle jusqu'à 46.12 % dans l'archétype A et de 46.20 % dans l'archétype B [11].

L'archétype A est composé d'un séjour orienté au Nord, une cuisine située au Nord-Est, deux chambres l'une orientée au Nord-Ouest et l'autre au Sud-Est, un garage situé au Sud et deux salles de bain l'une orientée au Sud-Ouest et l'autre au Sud-Est.

L'archétype B est composé d'un séjour orienté au Sud, une cuisine située au Sud-Ouest, deux chambres l'une orientée au Sud-Est et l'autre au Nord-Ouest, un garage situé au Nord et deux salles de bain l'une orientée au Nord-Est et l'autre au Nord-Ouest.

Dans la ville de Béchar, la consommation énergétique annuelle s'est réduite jusqu'à 46.12 % dans l'archétype A et jusqu'à 46.20 % dans l'archétype B. Le mur végétalisé est le système le moins efficace par rapport aux autres systèmes étudiés. Le système couplé a maintenu des conditions de confort thermique favorable. Une consommation énergétique de climatisation de plus de 50% s'est réduite pour les deux villes étudiées.

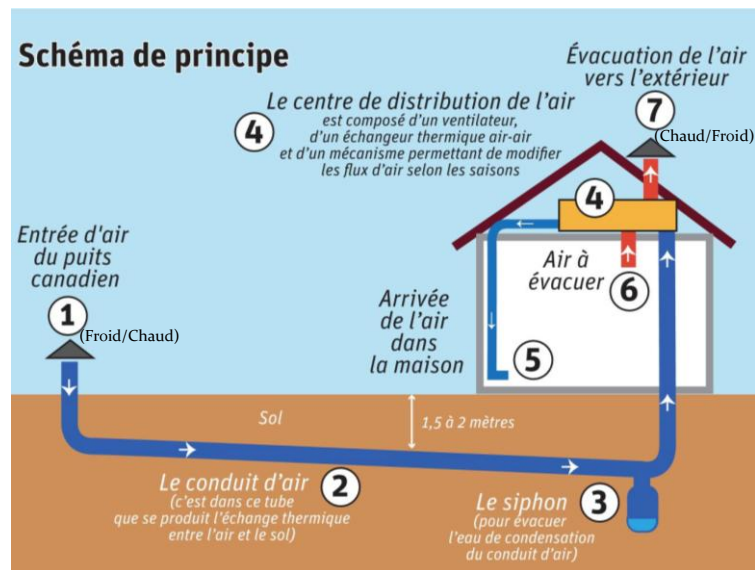


Figure I.1 : Schéma du principe de l'échangeur air-sol.

I.3.1. Systèmes de gestion intelligente de l'énergie

Le Smart System est une étape supplémentaire dans l'intégration des réseaux électriques et des technologies de l'information (figure I.3).

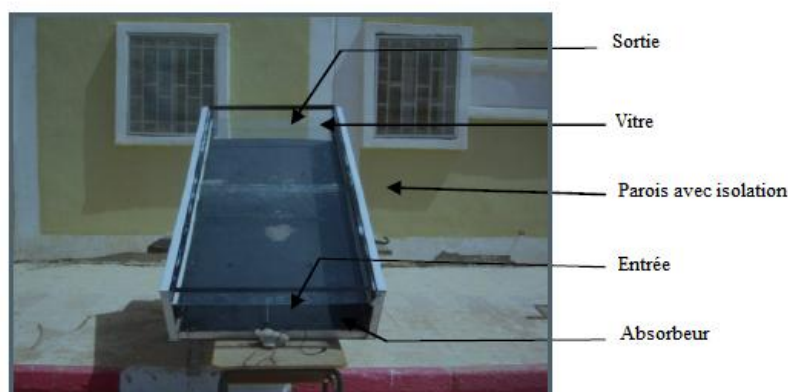


Figure I.2 : Schéma descriptif de La cheminée solaire.

Ces systèmes intelligents ont été rarement utilisés, mais de nombreux articles ont parlé de l'utilisation de ces systèmes dans d'autres domaines sous différents angles de vision.

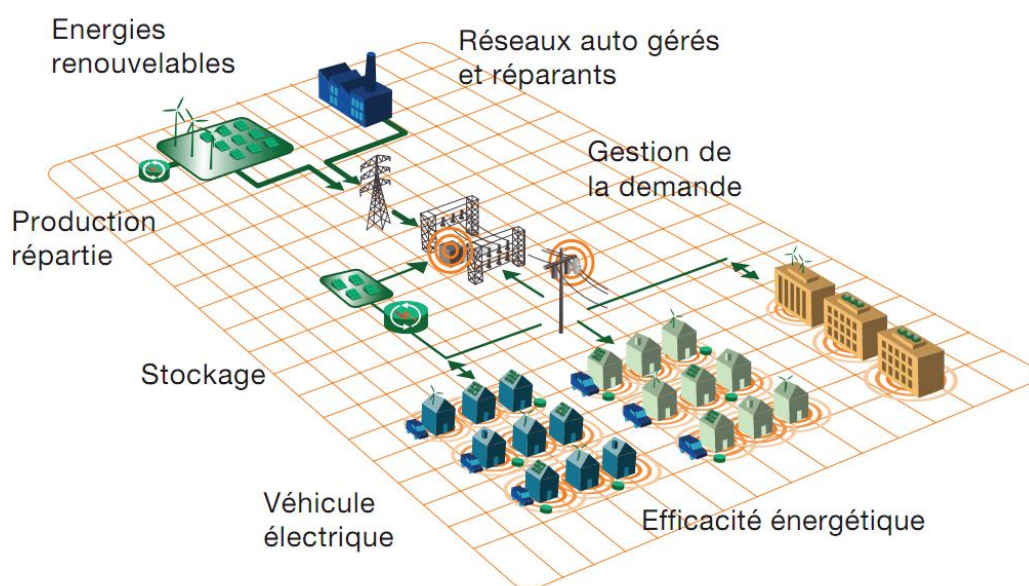


Figure I.3 : Principes de fonctionnement d'un système de Smart System.

Zhou et al. ont étudiés les concepts actifs et les stratégies de planification des systèmes de gestion intelligente de l'énergie pour les bâtiments résidentiels afin de réduire les coûts de l'électricité et d'améliorer l'efficacité énergétique découlant de la production d'électricité [12]. James Okae et al. [13] ont proposé un système intelligent de gestion de l'énergie dans les bâtiments, concluant que ce système intelligent révélait une plus grande fiabilité énergétique et une bonne efficacité de l'énergie utilisée.

Min Li et al. [14] ont analysé les caractéristiques de la maison intelligente, sa composition et les technologies déployées afin de mieux illustrer la conception du service d'électricité domestique intelligent et la relation entre les systèmes de communication.

I.3.2. Energie photovoltaïque

L'énergie solaire est une source d'énergie précieuse. Elle est renouvelable, inépuisable et non polluante. L'énergie photovoltaïque est définie par la conversion directe de la lumière solaire en électricité à l'aide de cellules solaires. La connexion de ces cellules fournit le courant électrique souhaité. Ce type d'énergie solaire présente des inconvénients tels que son intensité variée; son caractère intermittent et son coût élevé par rapport aux sources d'énergie conventionnelles [15].

Il existe trois types d'utilisation de cette énergie: énergie photovoltaïque connectée au réseau électrique, énergie photovoltaïque hybridée avec d'autres énergies renouvelables ou conventionnelles et énergie photovoltaïque autonome. Nous nous sommes basés en priorité sur un système autonome (figure I.4), le choix s'est fixé pour satisfaire au problème majeur des régions éloignées d'où l'absence du réseau électrique.

Le dimensionnement d'un générateur photovoltaïque a pour objectif la détermination de la puissance crête du champ des modules solaires, et la capacité des batteries associées à partir des données d'ensoleillement du site d'une part, et des besoins électriques de l'utilisateur d'autre part. Cette détermination des différents éléments doit garantir une fourniture d'énergie électrique tout au long de l'année ou éventuellement sur une période déterminée [16]. Donc, il doit exister à tout moment un équilibre entre la puissance active et la puissance réactive afin que la fréquence et la tension du courant alternatif (CA) du réseau demeurent constantes au point de couplage commun (PCC). Il existe trois procédures principales de dimensionnement des systèmes PV autonomes : des méthodes intuitives, numériques et analytiques et des méthodes individuelles. De nombreux

travaux de dimensionnement pour les systèmes PV peuvent être trouvés dans la littérature.

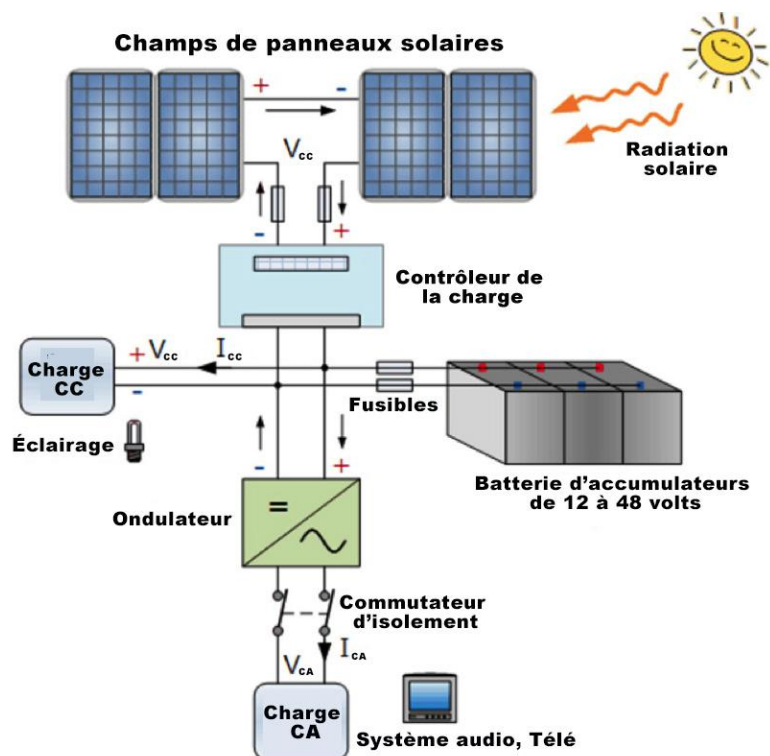


Figure I.4 : Exemple de système de stockage d'énergie par batteries (BESS) dans un système autonome.

En 2010, Al-salaymeh et al. [17] ont étudié la faisabilité de l'utilisation des systèmes photovoltaïques dans un appartement résidentiel standard à Amman-Jordanie selon deux types d'utilisation; autonome et connecté au réseau. Le coût du système PV nécessaire pour fournir cette énergie était d'environ 19793.95 USD, la période de récupération (retour d'investissement) du système photovoltaïque autonome a été estimée à 50 ans. Alors qu'elle a été estimée à 30 ans pour un système PV connecté au réseau. En retenant une augmentation annuelle de 3% de l'électricité, cette période s'est rétrécie à seulement 25 ans pour un système PV autonome et à 17 ans pour un système PV connecté au réseau. Les résultats montrent que l'installation d'un système PV autonome en Jordanie peut ne pas être économiquement gratifiante en raison du coût élevé par rapport au système PV connecté au réseau. Les installations photovoltaïques à grande échelle à distance peuvent être une option

stratégique pour un pays comme la Jordanie, potentiellement à fort gisement solaire avec de grandes zones désertiques. Ces données offrent certainement la possibilité de surmonter les limites économiques liées à cette technologie.

Certains travaux [18] se sont consacrés à des méthodes d'optimisation du système photovoltaïque autonome. Les données météorologiques moyennes journalières et les besoins de la charge correspondent à un site aux alentours de Daytona Beach, Florida aux États-Unis. La méthode de dimensionnement s'est basée sur la série temporelle climatique du site, en définissant le rapport temps de charge / décharge minimum dans une batterie. Les puissances PV minimales et maximales ont été identifiées pour calculer le nombre de batteries du système. Ensuite, le calcul du nombre de modules photovoltaïques a été effectué pour pouvoir choisir la configuration optimale en fonction du coût total minimal.

En 2013, Semaoui et al. [19] ont présenté un modèle d'optimisation pour le dimensionnement d'un système photovoltaïque autonome installé à Ghardaïa - Algérie, en utilisant MATLAB - Simulink. La méthodologie d'optimisation a été mise en œuvre en trois étapes; modélisation des composants autonomes du système photovoltaïque, développement d'un modèle de gestion de charge et développement des critères d'optimisation qui ont été effectués en fonction du critère de probabilité de perte d'alimentation (loss power supply probability, LPSP) et du coût d'énergie. Les variables météorologiques horaires et les données de la demande de charge ont été utilisées pour déterminer la configuration optimale de l'installation. Les auteurs ont constaté que l'utilisation de la gestion de la charge dans un système photovoltaïque autonome bien dimensionné peut engendrer une réduction significative du coût énergétique du système tout entier.

Un modèle développé a été étudié pour analyser les différences entre plusieurs technologies photovoltaïques. Les travaux se sont focalisés sur l'effet des efficacités quantiques en utilisant un modèle spectral semi-

empirique (figure I.5) [20]. Le modèle optimisé s'est basé sur le calcul des densités moyennes des photo-courantes pour chaque technologie (film mince ou cristallin) pour différentes orientations et inclinaisons. Deux sites de climats différents (Bergen - Suède, Tamanrasset - Algérie) ont été choisis. Les résultats ont montré que l'orientation optimale est la même pour toutes les technologies.

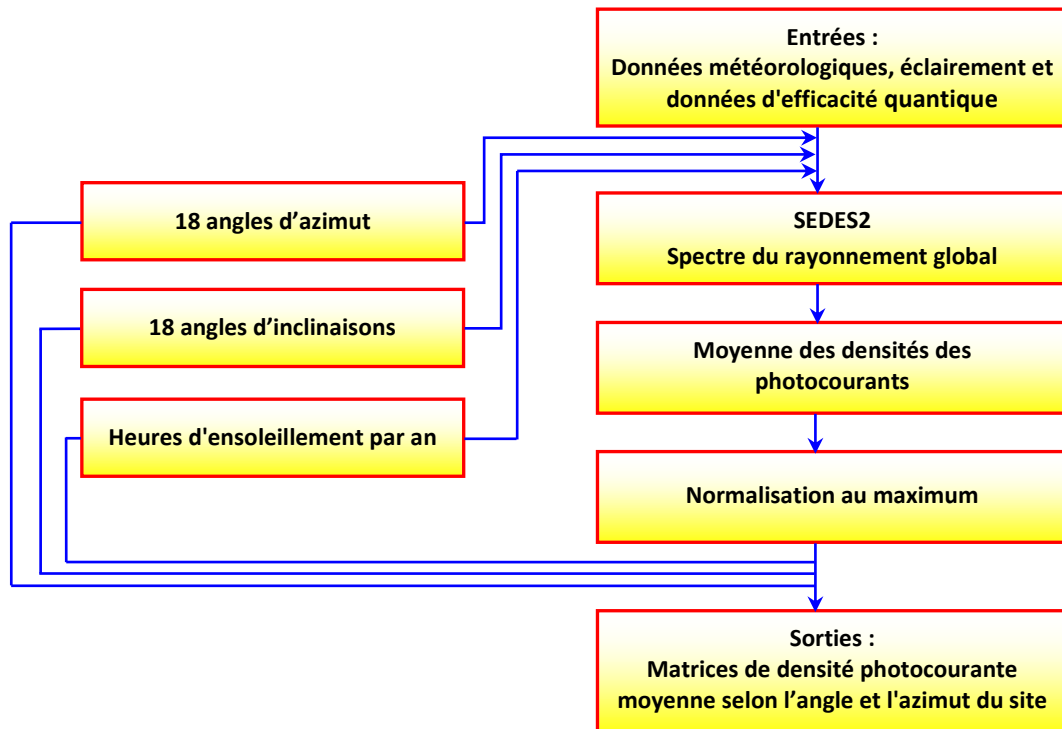


Figure I.5 : Structure du modèle spectral développé.

En 2013, l'article de Kazem et al. [21] a présenté une méthode pour l'optimisation de l'angle d'inclinaison des modules photovoltaïques à Sohar - Oman. Les scénarios se sont reposés sur des variations mensuelles, saisonnières (quatre saisons et deux saisons par an) et annuelles. Ils ont constaté que l'inclinaison optimale annuelle d'un module photovoltaïque est de 27° pour une latitude de $+ 3^\circ$. Une inclinaison fixe à 27° durant toute l'année a pu élever l'énergie solaire à 10.3% par rapport à l'énergie solaire recueillie par une surface horizontale. Les résultats ont montré aussi que l'angle d'inclinaison d'un générateur photovoltaïque doit être ajusté deux fois par an. Ils ont prouvé que l'inclinaison doit être fixée à 49° du 21 septembre au 21 mars et horizontalement au-delà de cet

intervalle. Cet ajustement va augmenter l'énergie collectée par le générateur à 20.6%. Le coût de l'énergie par ce système s'est estimé à 0.196 USD/kWh.

L'effet de la stratégie de la gestion d'énergie sur les performances du système a été étudié par Fathi et al. [22]. Ils ont pris comme exemple une centrale photovoltaïque de 7.2 kWc installée dans une région isolée en Maroc. Sur la base des données météorologiques journalières, il a été prouvé que la demande énergétique et la charge de la batterie ont affecté fortement la performance du système.

Une année après, Erdinc et al. [23] ont présenté une nouvelle perspective pour le dimensionnement d'un système photovoltaïque autonome basé sur des stratégies de réponse liées à la demande d'électricité. Le dimensionnement a considéré l'aspect techno-économique. La validation de la méthode s'est basée sur la charge d'une maison intelligente. La nouveauté de cette contribution a suscité une prise en compte du changement notable du profil journalier de la charge.

En même année, Martinez-Rubio et al. [24] ont proposé une méthode pour déterminer l'orientation la plus appropriée pour l'emplacement (azimut et inclinaison) des modules PV en maintenant une utilisation optimale des irradiances solaires. L'algorithme de calcul adopté s'est reposé sur l'estimation des irradiances solaires, l'ombrage des modules PV (sa durée) et les caractéristiques du toit conformément à l'organigramme de la figure I.6.

Dans un autre travail [25], une méthode optimale de dimensionnement des systèmes d'électrification rurale hors réseau à Ouganda a été proposée. Un concept de valeur de charge perdue a été utilisé pour déterminer l'énergie perdue selon les différentes configurations. Une fonction objective a permis de trouver un meilleur dimensionnement du générateur et une meilleure capacité des batteries du stockage.

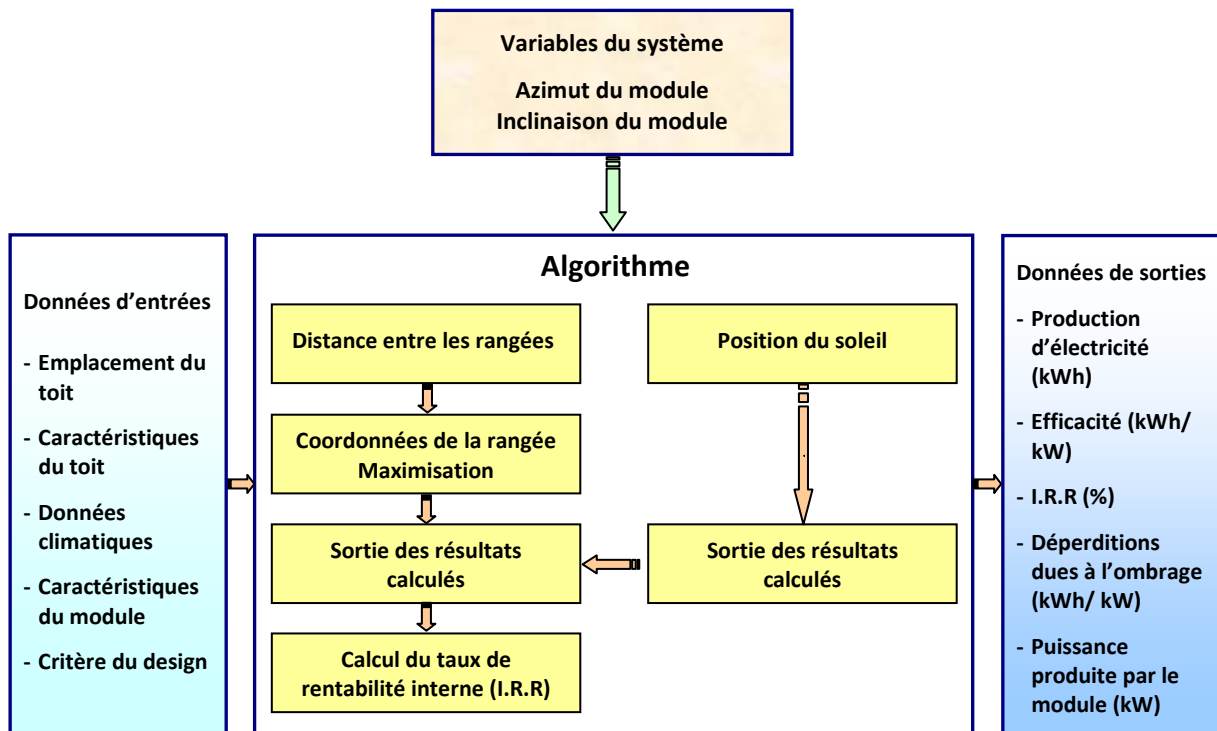


Figure I.6 : Organigramme de la méthode proposée.

Le générateur photovoltaïque a été modélisé en adoptant un modèle de régression, la modélisation de la batterie s'est effectuée en utilisant un modèle statique qui peut affecter la précision des résultats du dimensionnement. Ces effets peuvent entraîner une augmentation du coût unitaire de l'énergie générée.

Récemment, en 2017, Belmili et al. [26] ont utilisé la commande à logique floue pour déterminer la puissance maximale des générateurs photovoltaïque et éolien. Ils ont conçu un dimensionnement optimal du système pour une minimisation comprise entre 3 et 9% des puissances installées, ce qui a conduit à des économies d'énergie et du coût total du système.

Un travail similaire, achevé par El Shenawy et al. [27], s'est focalisé sur l'utilisation de l'énergie solaire photovoltaïque afin d'assurer une énergie électrique d'un local de 50 m² de superficie dans une zone rurale située à Shalateen (Égypte). Ils ont suivi une méthodologie en plusieurs étapes, parmi lesquelles le dimensionnement des composants pour un meilleur dimensionnement du système photovoltaïque autonome en

question. Ils ont analysé économiquement ce système tout en indiquant que le générateur photovoltaïque avait le coût le plus élevé.

Sous l'effet des conditions météorologiques indiennes, Javed et al. [28] ont proposé quatre types de profils de charge associés à un système photovoltaïque autonome. La conception et sa simulation ont été fondées sur un projet sous l'environnement de simulation PVSyst. L'analyse des coûts a montré que ce système, basé sur un profil de charge optimisé, (tableau I.1) a présenté économiquement un meilleur mode de conception qui sera appliqué à un système photovoltaïque autonome.

Tableau I.1 : Proposition du profil de charge optimisé [28].

N	Équipement électrique	Quantité	Puissance (W)	Puissance totale (W)	Durée du fonctionnement (h/jour)	énergie requise (Wh/jour)
1	Lampes de type LED	10	20	200	20	4000
2	Ventilateur	4	60	240	20	4800
3	TV / PC	2	80	160	8	1280
4	Appareils électroménagers	5	100	500	5	2500
5	Autres utilisations	5	100	500	2	1000
	Totale			1600		13580

I.3.3. Chauffe-eau solaires

Le solaire actif fonctionne grâce à des appareils et des dispositifs mécaniques qui récupèrent et emmagasinent la chaleur. Le chauffe-eau solaire est un complément aux chauffe-eau électriques et autres chauffe-eau à gaz pour permettre aux occupants d'un logement (individuel ou collectif) de couvrir une large part de leurs consommations d'eau chaude sanitaire, grâce à l'énergie solaire.

Il existe de nombreux modèles de chauffe-eau solaires. Ils se diffèrent selon, le type de chauffe-eau, la capacité du ballon de stockage et la surface des capteurs. Le chauffe-eau solaire se compose d'un ou des capteurs solaires relié à un ballon de stockage. Le soleil chauffe un fluide qui circule dans les capteurs, ce fluide chauffe l'eau sanitaire du ballon de stockage en passant dans un échangeur.

Ce dispositif présente plusieurs avantages :

- La production de l'eau chaude sanitaire n'émet aucun polluant
- La source énergétique est le soleil, qui est une énergie gratuite, renouvelable et abondante
- Cette technologie est mature, elle peut offrir un rendement supérieur à 80% en été
- Réduction considérable des émissions du CO₂

On distingue deux types de capteurs solaires : un capteur plan (figure I.7-a), et un capteur à tubes sous vide (figure I.7-b).

Les performances globales de deux types de capteurs solaires (capteur à tubes en verre et capteur à tubes sous vide) ont été comparées sous un climat méditerranéen. Ils ont conclu que la performance d'un capteur solaire à tubes sous vide est meilleure par rapport à un capteur classique à tubes en verre [29].



Figure I.7 : Types de capteurs solaires : (a) Capteur plan (b) Banc d'essai expérimental et son schéma synoptique.

Certaines études [30] ont été consacrées à deux procédures d'expérimentation d'un capteur solaire à tubes sous vide. Le schéma synoptique du système expérimental est donné par la figure I.8. La démarche adoptée s'est basée sur la comparaison des rendements en fonction de deux types de fluide caloporteur contenant des nanofluides préparés. Les résultats ont montré que le rendement maximal du système en utilisant un nanofluide de type TiO₂-eau est de 0.73. Pour l'eau distillée, il est de 0.53. Un capteur solaire à tubes sous vide à base d'un

nanofluide de type Al_2O_3 -eau devrait avoir un rendement supérieur de 8% par rapport au nanofluide à base de TiO_2 -eau.

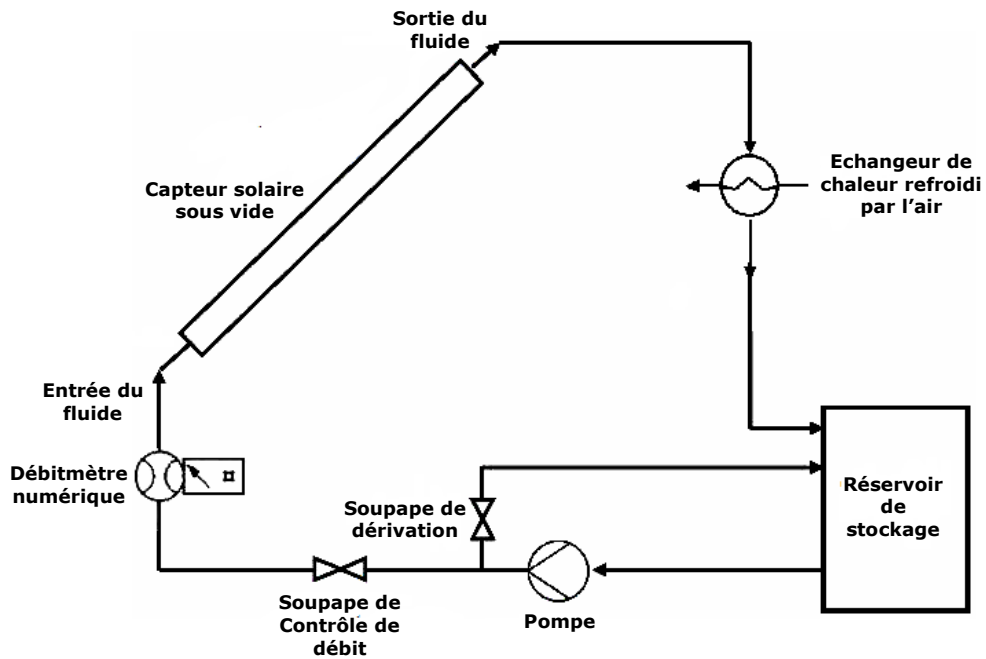
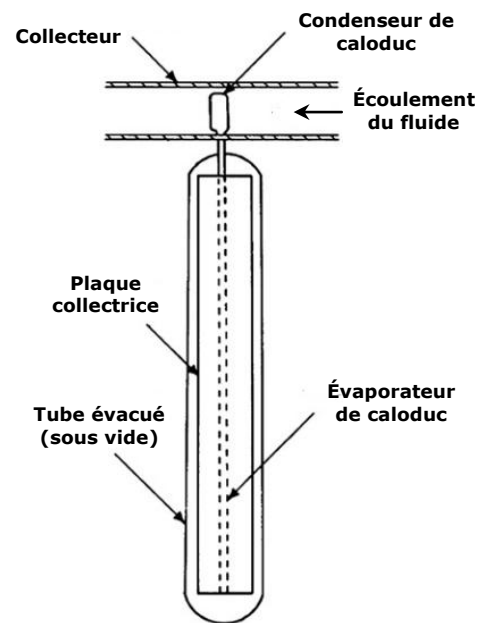


Figure I.8 : Schéma synoptique du système expérimental.

Les images et le schéma détaillé d'une installation expérimentale de production d'eau chaude sont représentés par la figure I.9. La surface captante du chauffe-eau solaire est de 3 m^2 .



- a -

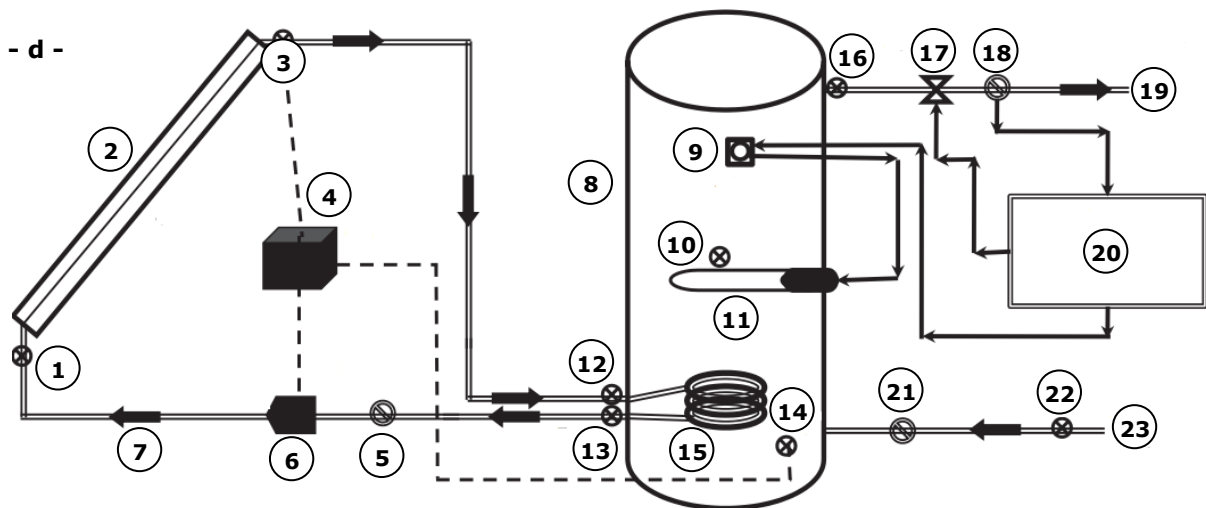


- b -



- c -

- | | |
|--|--|
| 1. Entrée du capteur | 13. Sortie de la bobine solaire |
| 2. Capteur solaire sous vide | 14. Fond du ballon d'eau chaude |
| 3. Sortie du capteur | 15. Bobine solaire |
| 4. Régulateur solaire | 16. Température d'alimentation de l'eau chaude |
| 5. Débitmètre à impulsion | 17. Électrovanne |
| 6. Pompe | 18. Débitmètre à impulsion |
| 7. Fluide solaire | 19. De l'eau chaude à la demande |
| 8. Réservoir d'eau chaude | 20. Demande d'eau chaude & Système de contrôle du chauffage auxiliaire |
| 9. Thermostat | 21. Débitmètre à impulsion |
| 10. Température du ballon d'eau chaude | 22. Température d'entrée de l'eau froide au réservoir d'eau chaud |
| 11. Thermoplongeur | 23. Eau froide entrant dans le système |
| 12. Entrée de la bobine solaire | |



- d -

Figure I.9 : Description de l'installation expérimentale, a: Collecteur de type Thermomax HP200 à 30 tubes sous vide, b: Tube sous vide caloduc, c: Collecteur, d: Schéma synoptique de l'installation expérimentale.

L'analyse et l'étude de ce système ont été rapportées par Ayompe et Duffy [31] en 2013 sous des conditions météorologiques de Dublin (l'Irlande). Les résultats ont prouvé que 7435.1 MJ a été collecté d'un rayonnement solaire global annuel qui s'est rapproché à 11760.3 MJ. L'énergie correspondante entrante au ballon de stockage est de l'ordre de 6121.1 MJ. La fraction solaire annuelle était de 33.8%, l'énergie auxiliaire fournie pour répondre à une demande en eau chaude de 18 100.4 MJ est de 11 973.3 MJ. La température maximale enregistrée du fluide collecteur

à la sortie de la cuve était de 70.3 °C. Tandis que la température maximale de l'eau chaude au niveau inférieur s'est estimée à 59.5 °C.

Les ailettes d'absorbeurs peuvent influencer sur l'efficacité d'un capteur solaire sous vide. Cet objectif a été mené par Zhang et al. [32], ils ont proposé une étude comparative entre deux capteurs avec des tubes sous vide différents (figure I.10). La configuration du tube sous vide à ailettes d'absorbeurs a permis de réduire plus sensiblement les déperditions thermiques. L'efficacité du capteur solaire à ailettes était de 54.70% à la température d'entrée la plus élevée (123.9 °C), elle a présentée plus de 31.49% par rapport à un capteur solaire sans ailettes. Le coefficient de déperditions du tube sous vide avec ailettes est estimé à 1.86 W/ (m² K), ce qui a représenté une amélioration de 50.80% par rapport au premier capteur.

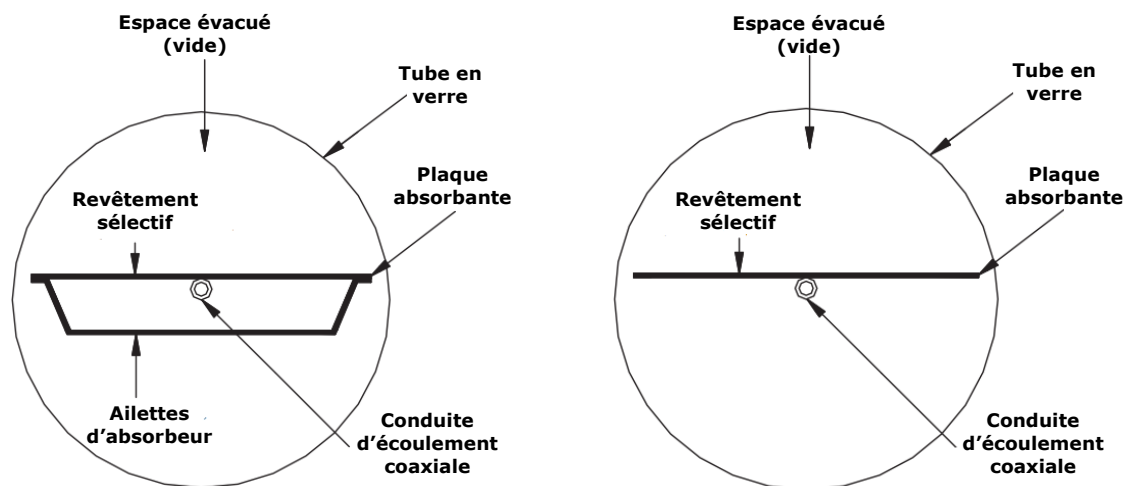


Figure I.10 : Coupes transversales des tubes sous vide: avec (à gauche) et sans (à droite) ailettes d'absorbeur.

En effet, deux capteurs solaires sous vides ont été privilégiés pour des applications à plus haute température et pour permettre à la chaleur du rayonnement solaire d'être collectée à un rendement relativement élevé. Pour ce faire, deux types ont été conçus, le premier avec des tubes de forme U, le deuxième se compose des tubes sous vide de type caloduc (figure I.11). Les résultats obtenus ont montré que chaque type a présenté des avantages, une concordance élevée entre la simulation et les résultats expérimentaux pour les deux types de capteurs a été constatée.

Il a été prouvé que l'efficacité d'un tube sous vide caloduc est plus importante (supériorité de 8%) par rapport à un tube sous vide de forme U, sous un ciel coréen clair. Au contraire, le tube sous vide de forme U a présenté des performances thermiques plus stables et meilleures quand il était nuageux [33].

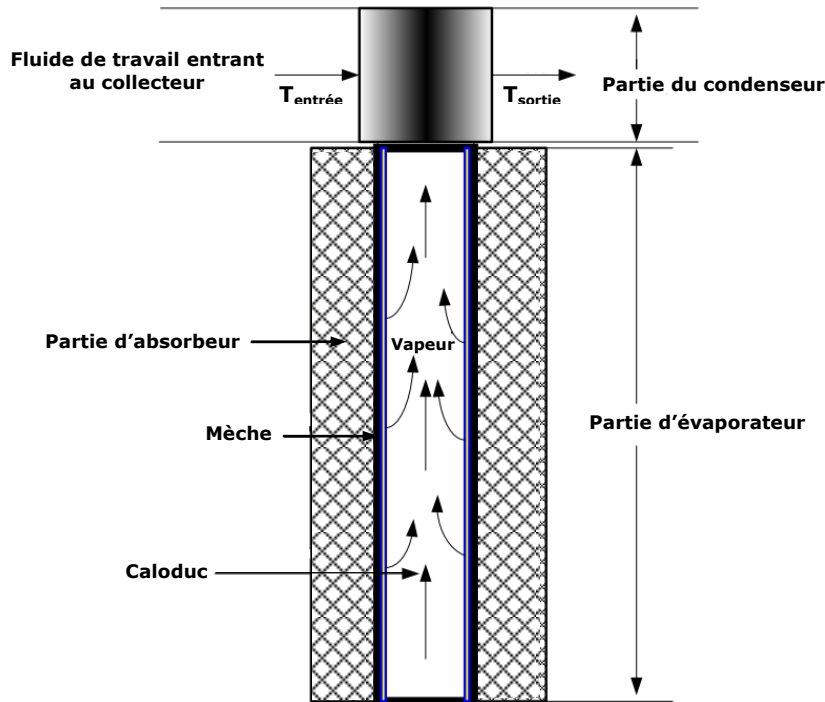


Figure I.11 : Coupe transversale d'un tube sous vide caloduc.

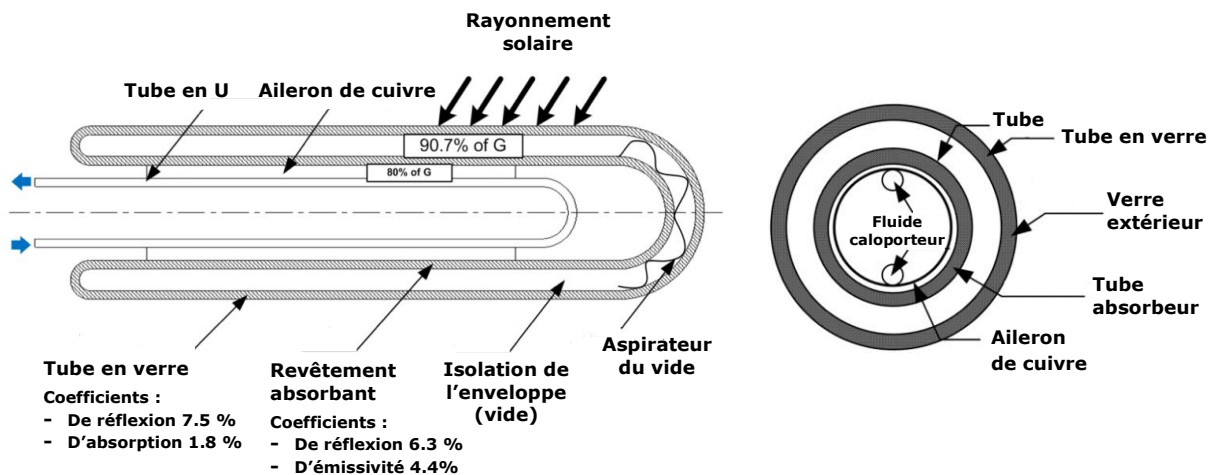


Figure I.12 : Pertes optiques et coupe transversale d'un tube sous vide de forme U.

Une autre contribution [34] s'est consacrée à une étude sur les performances d'un capteur solaire à tubes sous vide sous l'effet de

différentes conditions climatiques d'Iran par logiciel TRNSYS 16. En utilisant un algorithme génétique sous MATLAB, ils ont pu améliorer son rendement instantané. L'optimisation de l'efficacité thermique s'est basée sur le tube intérieur, la longueur du tube, la vitesse de circulation naturelle du fluide entre les tubes et l'angle d'inclinaison du collecteur. Les résultats ont donné une efficacité optimale qui s'est fixée à 0.6927. En la comparant avec l'efficacité annuelle moyenne, il s'est trouvé qu'une amélioration de 12.4% s'est observée pour des conditions climatiques correspondantes à la ville de Téhéran.

Selon Gill et al. [35], un système de chauffe-eau solaire à tubes sous vide installé sur un logement de 5 occupants à Dublin peut produire jusqu'à 1216 kWh d'énergie utile avec un rendement évalué à 62.8%.

À la suite, en 2017, Kabeel et al. [36] ont conçu un caloduc coaxial modifié (figures I.13 et I.14) pour l'amélioration des performances thermiques du capteur solaire à tubes sous vide. Le caloduc coaxial a été testé pour des débits de masse d'air différents : 0.0051, 0.0062, 0.007 et 0.009 kg/s. Les résultats ont montré que le rendement thermique a pu atteindre une valeur maximale de 67% si le débit massique est de 0.009 kg/s.

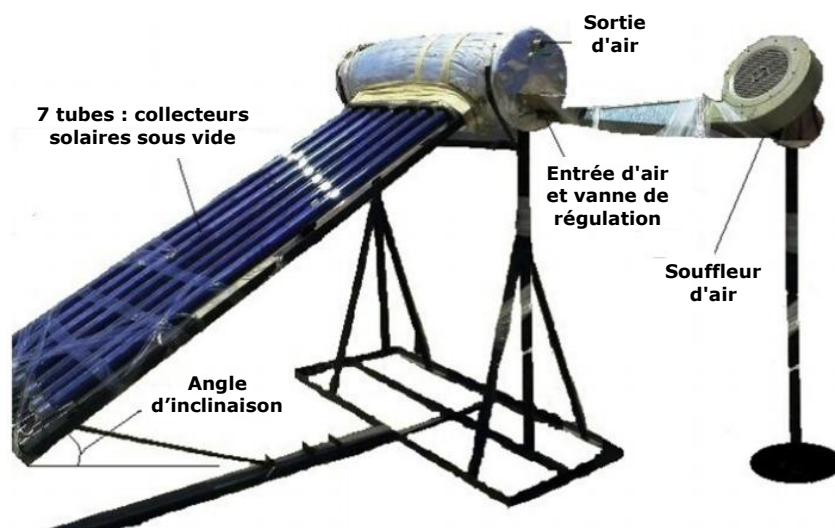


Figure I.13 : Banc d'essai expérimental.

Après une année, Jowzi et al. [37] ont testé expérimentalement les caractéristiques du transfert de chaleur. La démarche suivie s'est basée sur la distribution du rayonnement solaire autour d'un seul tube sous vide.

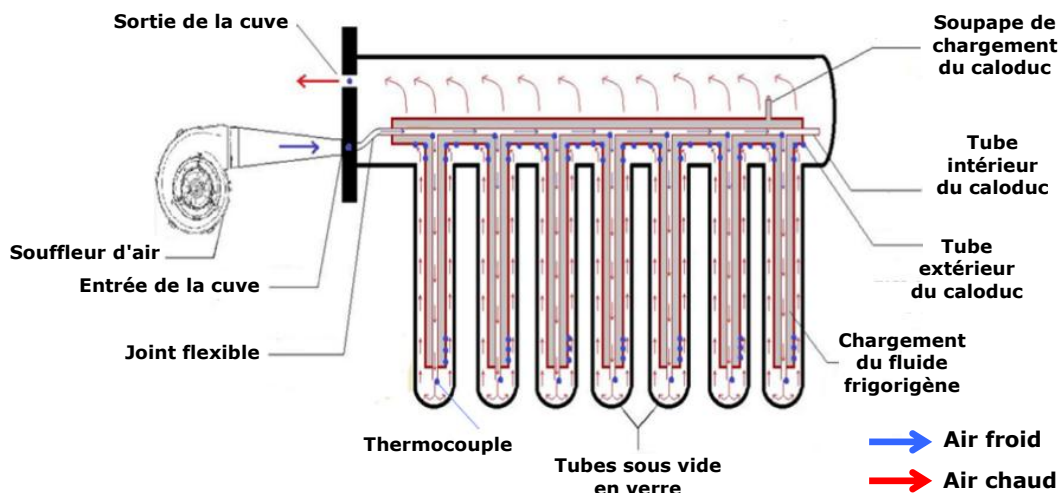


Figure I.14 : Le schéma du capteur solaire à tubes sous vide avec caloduc coaxial.

La détermination du rendement thermique du capteur s'est effectuée à l'aide d'un compteur solaire durant plusieurs heures. De nouvelles corrélations ont été développées pour estimer l'intensité des irradiances solaires à la surface du capteur. Le rendement thermique du capteur solaire a changé fortement en variant la taille de la section transversale, la position géographique, l'angle horaire, et le fluide caloporteur utilisé.

Par ailleurs, Elsheniti et al. [38] ont montré que la température à la sortie d'un capteur solaire sous vide caloduc est proportionnelle par rapport au nombre de tubes sous vide, mais le rendement thermique a été meilleur pour un plus petit nombre de tubes. La prédiction du rendement a été effectuée en fonction du débit du fluide entrant, la température d'entrée et le nombre de tubes sous vide.

En fin, en statistiques, la méthode des surfaces de réponses a pour but d'explorer les relations entre les variables dépendantes et indépendantes impliquées dans une expérience. Dans ce contexte, Sarafraz et al. [39] ont proposé une étude expérimentale basée sur cette méthode pour optimiser les performances d'un capteur solaire à tubes sous vide. Ils ont étudié l'effet des trois paramètres opératoires à savoir : le taux de remplissage des caloducs, l'angle d'inclinaison du capteur et la fraction massique de dispersion des nanotubes de carbone dans l'eau distillée sur le rendement thermique du capteur. Les résultats obtenus ont

montré que cette méthode est capable d'optimiser l'efficacité de capteur avec une précision de 1.6%. De plus, ils ont constaté que la présence de nanotubes de carbone à l'intérieur des caloducs a pu favoriser le mécanisme d'ébullition nucléée qui à son tour augmente le rendement du capteur solaire. La valeur du taux de remplissage optimal et l'angle d'inclinaison ont été identifiés, il s'est révélé qu'elle est égale à 0.6 pour le taux de remplissage optimal et 55° pour l'angle d'inclinaison.

I.4. Brève description des concepts passifs

Les techniques passives utilisent les phénomènes naturels de transfert d'énergie afin de minimiser les déperditions thermiques à travers l'enveloppe du bâtiment. Ces techniques permettent aux occupants d'assurer une utilisation plus rationnelle et plus efficace des ressources énergétiques, en créant des conditions de confort physique et psychologique désirées, tout en limitant le recours aux systèmes mécaniques de chauffage et de climatisation.

I.4.1. Ajustement du gain solaire & Orientation et avant-toit

Les apports solaires représentent l'énergie due à l'ensoleillement direct à travers les vitrages. Les ouvertures se sont des éléments qui influent sur la performance thermique des bâtiments, tant pour le confort thermique intérieur que pour la consommation énergétique due au chauffage et/ou au refroidissement [40]. L'optimisation de l'orientation joue un rôle prépondérant pour maintenir les conditions de confort thermique, soit en hiver ou en été.

En 2015, une nouvelle méthodologie pour le calcul de la distribution de l'énergie solaire sur les surfaces internes des espaces fermés avec une ouverture à différentes positions et orientations a été introduite [41]. Un modèle analytique pour l'évaluation du facteur de correction des gains solaires à travers les surfaces vitrées, selon la norme EN ISO 13790, a été aussi défini dans [42].

Une année après, un modèle mathématique pour calculer les gains solaires à travers les façades à multiples vitrages (avec des stores vénitiens en cas d'une réflexion spéculaire) a été proposé dans [43].

En vue de contrôler les apports solaires accessibles, Thalfeldt et al. [44] ont réussi d'étudier l'influence de la dimension des fenêtres dans un climat froid. Ils ont souligné par la suite que la dimension des fenêtres orientées vers le Sud n'aura pas un effet remarquable sur les besoins en chauffage, alors que les fenêtres de petites surfaces peuvent être utiles pour réduire la consommation énergétique due aux surchauffes.

Semahi et Djebri [45] ont mené un travail qui s'est porté sur la conception des logements à haute performance énergétique en Algérie en contribuant à une analyse bioclimatique de la région de Béchar. Les auteurs ont présenté un outil d'aide utile à la conception dans les zones arides et semi-arides.

En fait, en 2011, il a été démontré qu'une bonne conjonction entre l'orientation, l'isolation thermique et les avant-toits peut conduire à des meilleures conditions du confort, notamment pour les régions sahariennes et désertiques [46]. Les gains solaires des fenêtres orientées au sud sont plus faciles à prendre en charge. La figure I.15 ci-dessous montre que pour une façade orientée au sud, les gains solaires en été peuvent être bloqués à l'aide d'un avant-toit ou ce qu'on appelle un auvent. En fait, le rayonnement solaire peut pénétrer presque complètement en hiver. En mi-saison, le rayonnement solaire passe partiellement. Cela ne vaut que pour l'orientation au sud, étant donné que le soleil atteint sa position la plus élevée dans cette orientation. Les façades orientées à l'est et à l'ouest sont confrontées toute l'année à des positions basses du soleil (soleil levant ou soleil couchant) [47]. Le choix des dimensions et la forme des ouvertures jouent un rôle très important en vue d'utiliser passivement l'énergie solaire. Pour ce faire, il est judicieux de positionner les espaces présentant des besoins de chaleur importants du côté sud [47]. Les gains solaires provenant des ouvertures horizontales sont difficiles à maîtriser.

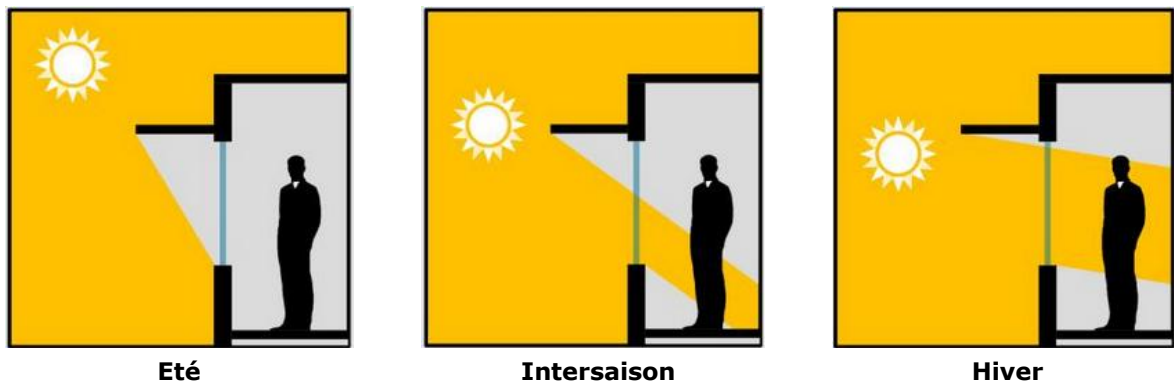


Figure I.15 : L'intégration d'un auvent sur une façade coté sud.

Ils peuvent présenter des sources principales de surchauffe à cause des ouvertures horizontales qui favorisent un large passage du faisceau solaire en été. C'est pour cette raison qu'il faut opter pour des ouvertures latérales verticales. En plus, contrairement à l'été, en hiver les ouvertures verticales favorisent un fort passage du faisceau solaire. En introduisant les schémas descriptifs dans la figure I.16, on pourra comprendre le concept architectural le plus approprié (ouvertures latérales) [47].

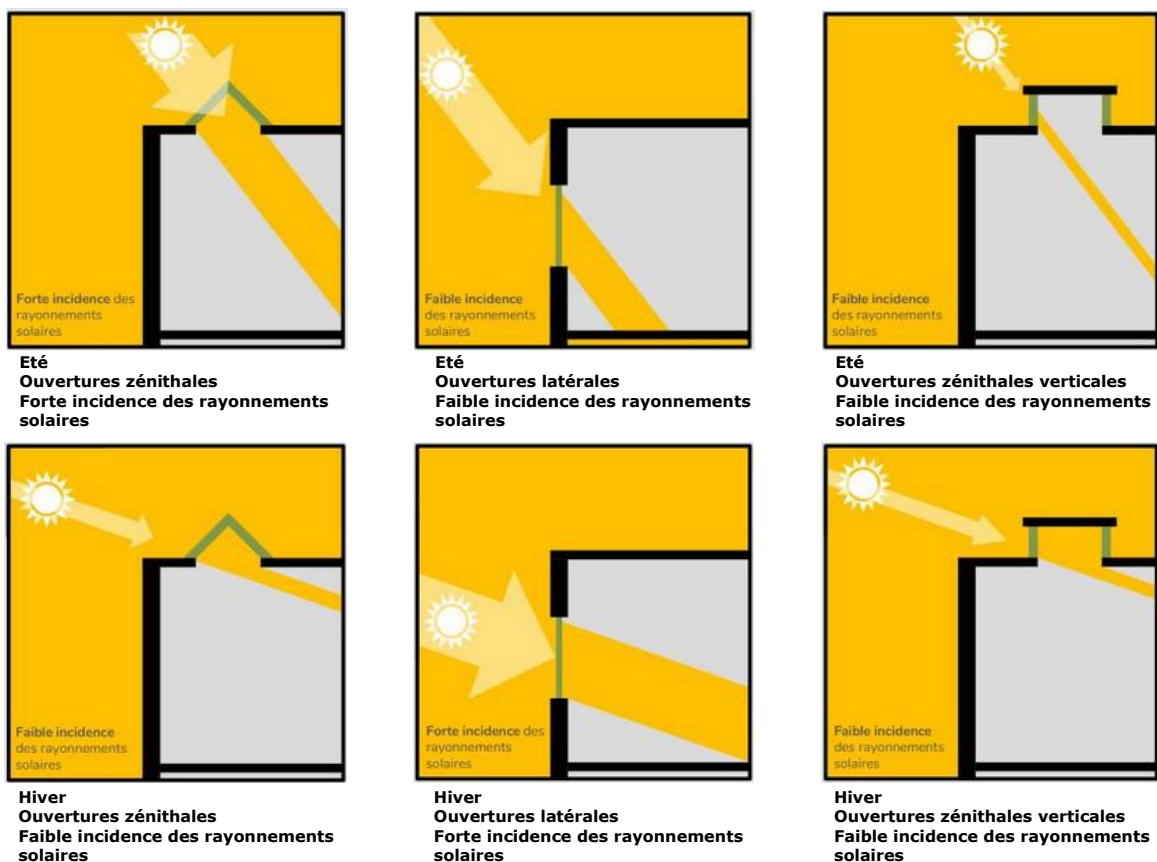


Figure I.16 : Différence entre les ouvertures latérales et zénithales.

Cependant, une part importante de l'échange de chaleur entre les bâtiments et l'environnement ambiant est due aux flux thermiques convectifs et radiatifs. Dans ce sens, une simulation détaillée de l'énergie des bâtiments a été utilisée pour analyser l'effet des bâtiments voisins sur ces flux et leur influence sur les besoins énergétiques (refroidissement et chauffage) des bâtiments en question. Cette étude a confirmé l'importance de prendre en considération le microclimat urbain envers la prédiction de la demande énergétique. Une importance capitale a été accordée à la géométrie, l'orientation et à la compacité [48].

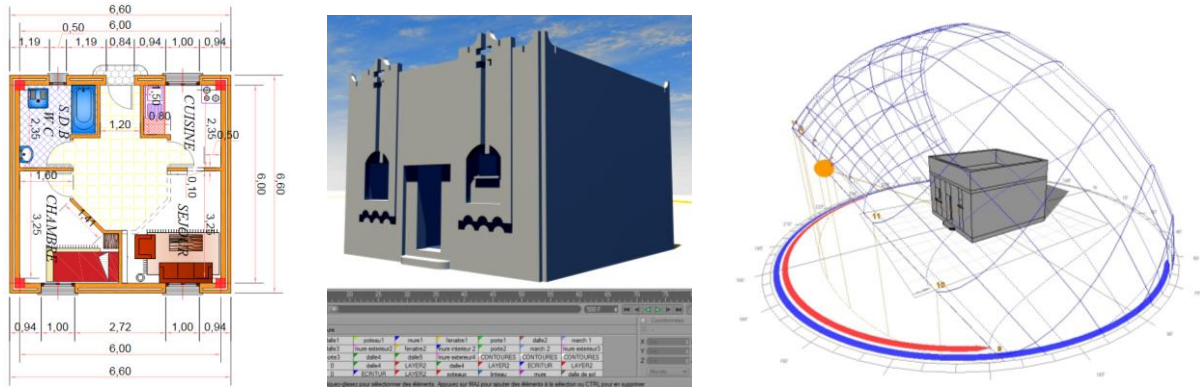
I.4.2. Compacité

Quelques travaux [49-52] ont montré aussi que le niveau de la compacité d'un bâtiment dépend de la forme, de la taille des structures et ses caractéristiques. Les résultats ont indiqué que la compacité est meilleure lorsque l'indice de compacité est faible. Etant donné que la compacité d'un bâtiment est le rapport entre son volume chauffé et sa surface de déperdition, c'est à dire l'enveloppe extérieure du bâtiment. Plus un bâtiment est compact (en diminuant plus son indice de compacité), plus il est facile d'atteindre des performances énergétiques élevées.

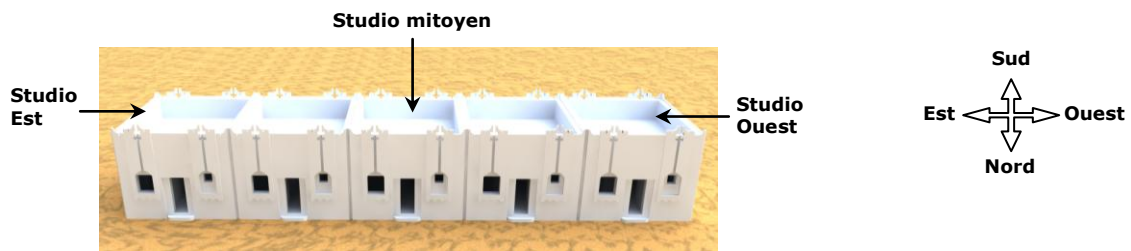
Bendara et al. [50] ont étudié l'impact de la compacité sur les besoins énergétiques d'un studio multizone. Ils ont pu déterminer les économies potentielles sous un climat saharien sans et avec isolation thermique. Les quatre configurations qui ont été proposées sont comme suit:

- 1^{er} cas : Studio écarté des abris d'ombrage, c'est à dire exposé à tous niveaux au rayonnement solaire totale (figure I.17 -a-). Son indice de compacité est de 1.27.
- 2^{ème} cas: Studios du côté Est et Ouest (figure I.17 -b-). L'indice de compacité est de 1.12.
- 3^{ème} cas: Studio mitoyen (figure I.17-b-). L'indice de compacité est de 0.97.
- 4^{ème} cas: Studio plus compact (figure I.17-c-). L'indice de compacité est de 0.64.

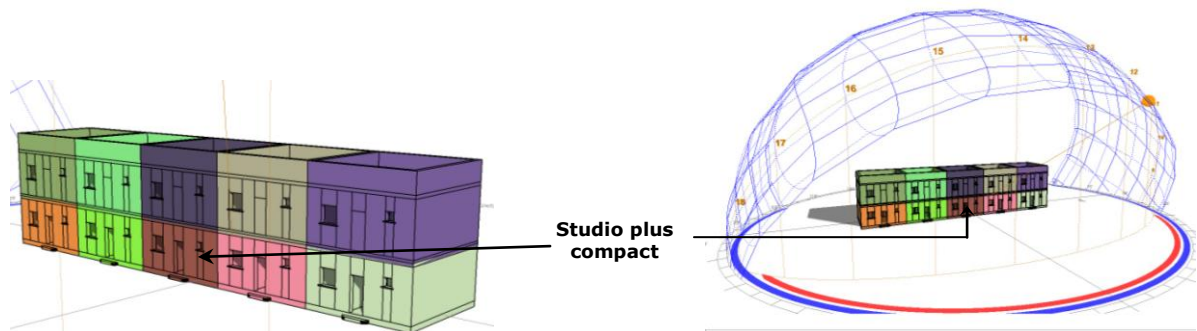
Zone thermique	Surface (m ²)
Salon	7.75
Cuisine	4.90
Bloc sanitaire	4.90
Espace de dégagement lié au hall	8.80
Chambre	7.75



(a): Studio avec exposition totale



(b): Studio avec exposition partielle



(c): Studio avec exposition partielle et une meilleure compacité

Figure I.17 : Plans descriptifs 2D et 3D du studio pour différents types d'exposition (totale, mitoyenne et partielle).

Les résultats ont révélé que la meilleure efficacité du gain solaire a été observée pour une meilleure isolation et une bonne compacité, une réduction de 12.51% des besoins énergétiques peut être obtenue. La compacité avait un effet attractif à condition que le bâtiment soit bien isolé.

I.4.3. Isolation thermique de l'enveloppe & Compréhension des mécanismes thermo-physiques

Les caractéristiques thermo-physiques de l'enveloppe ont une forte influence sur la performance et l'efficacité du bâtiment. Dans cette optique, il est recommandé d'utiliser les isolants pour améliorer les performances de l'édifice et réduire la facture énergétique. La question pertinente qui peut se poser est de savoir opérer un premier choix de l'isolant du fait de leur qualité et limite.

Les principales familles des isolants sont d'origine minérale, pétrochimique, végétale et les matériaux dits réflecteurs. Une nouvelle famille a fait l'objet de nombreuses recherches et semble assez prometteuse, il s'agit entre autre de peintures, films minces et autres parements faisant appel aux nanotechnologies et aux changements de phases. Ces derniers ne sont pas vraiment au sens courant du terme des isolants mais beaucoup plus des matériaux capables à accumuler de l'énergie [53].

Couramment, l'unique critère retenu pour qualifier un isolant est sa conductivité thermique, c'est à dire son seul pouvoir isolant. On ne tient pas compte de la densité du matériau. Pourtant un matériau plus dense aura une meilleure capacité thermique, donc une plus grande capacité à stocker la chaleur et à la restituer plus tard, c'est ce qu'on appelle par définition le déphasage. Ce déphasage est utile pour l'isolation des rampants ou sous-toitures qui exigent un déphasage important pour éviter les surchauffes estivales [54]. Un bon déphasage (10 à 12h) exige un bon isolant qui favorise un compromis de densité, exemples: laine de bois, chanvre, cellulose, liège. Les fabricants indiquent généralement la valeur du déphasage qui sera exprimée en heures et en fonction de l'épaisseur.

a. Calcul du déphasage

Cette partie sera consacrée aux formules de calcul [55]. Le déphasage est donc l'épaisseur divisée par la célérité :

$$\text{Déphasage} = \frac{\text{Epaisseur}}{\text{Célérité}} \quad (\text{I.1})$$

La célérité est la vitesse de diffusion de la chaleur à travers une paroi, elle est égale à :

$$\text{Célérité} = \frac{2 \pi}{T \sqrt{\pi/T}} \sqrt{a} \quad (\text{I.2})$$

T correspond à la période d'oscillation de la température extérieure sur une durée de 24 heures.

$$a = \frac{\lambda}{\rho c} \quad (\text{I.3})$$

ρ : la masse volumique exprimée en kg/m^3 .

c : la capacité thermique massique de la paroi exprimée en J/kg/K .

λ : la conductivité thermique du matériau exprimée en W/m/K .

La combinaison des deux formules nous donne le déphasage :

$$\text{Déphasage} = \frac{e T \sqrt{\pi/T}}{2 \pi \sqrt{a}} \quad (\text{I.4})$$

e : l'épaisseur de la paroi (m).

Le déphasage journalier sera donc donné par l'équation suivante :

$$\text{Déphasage}(T : 24 \text{ h}) = \frac{1.38 e}{\sqrt{a}} \quad (\text{I.5})$$

a : la diffusivité de la paroi (m^2/s), elle caractérise la capacité du matériau à transmettre un signal de température d'un point à un autre de ce matériau. En essayant d'aborder ce sujet en apportant quelques éclaircissements (analogie réelle) à l'appui.

b. Interprétations issues des grandeurs thermo-physiques

Les équations précédentes révèlent trois variables propres au matériau.

1. c : la capacité thermique massique laquelle sera présentée par un seau d'eau, dont en fonction de sa taille on évaluera la capacité "plus ou moins" important à stocker les calories.
2. λ : la conductivité thermique (λ), ce sont les fuites, ce seau est percé et selon le diamètre du trou elles seront plus ou moins importantes, elles seront canalisée par un tuyau.

3. ρ : la masse volumique, représentée par un nombre plus ou moins grand de seaux.

Imaginons le fonctionnement théorique, lançons l'apport des calories dans le premier seau, quand il sera plat, il débordera dans le deuxième qui, lui-même débordera dans le troisième et ainsi de suite jusqu'à la fuite finale et la sortie des calories. Nous faisons une analogie avec deux matériaux.

Pour le premier matériau (figure I.18), petit seau donc faible capacité de stockage, peu nombreux donc faible densité, avec des tuyaux de petits diamètres donc faible niveau de fuite et très bon lambda. Plus le lambda est petit plus on aura une meilleure isolation.

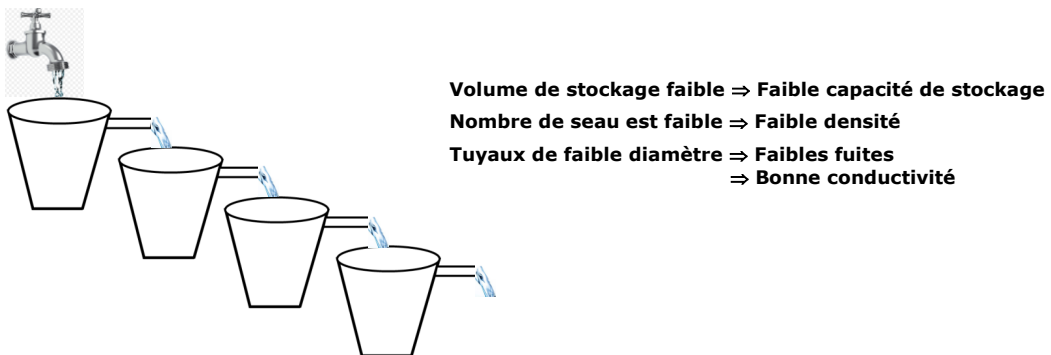


Figure I.18 : Représentation illustrative du premier matériau.

Pour le deuxième (figure I.19), les seaux sont plus grands et plus nombreux avec des tuyaux d'évacuation de plus grand diamètre. Les fuites donc sont plus importantes, ce qui traduit un moins bon lambda.

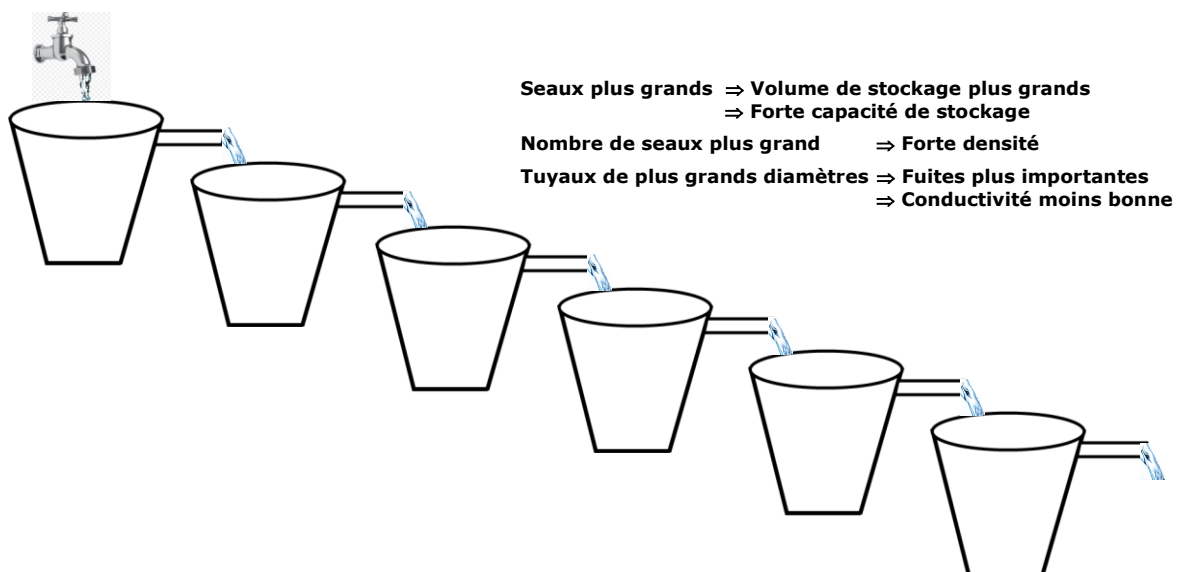


Figure I.19 : Représentation illustrative du deuxième matériau.

Les calories extérieures vont remplir petit à petit les seaux jusqu'à ce qu'au bout d'un certain temps elles vont traverser la matière puis s'échapper.

Dans le premier matériau, malgré une fuite faible en raison du petit volume des seaux, les calories vont remplir rapidement le premier seau puis se déverser dans le second. En même temps, dans le second matériau, ils vont se vider moins vite à cause de la grande taille des seaux, alors même qu'ils fuiront plus et ainsi de suite. Ceci veut dire que malgré les plus grosses fuites, ce deuxième matériau sera compensé par la plus grande capacité thermique des seaux (qui sont plus grands) et une masse volumique plus importante (nombre de seaux plus grand).

Ces deux exemples montrent comment un matériau avec moins de fuites mais avec peu de capacité de stockage peut être moins performant en le comparant avec un matériau avec plus de fuites qui s'échappent plus lentement. Par conséquent, on pourra effectuer une projection du fonctionnement de ces deux matériaux par rapport à la laine minérale (1^{ère} matière) et la laine du bois (2^{ème} matière).

- La première matière

Matériau d'origine minérale de faible conductivité thermique (donc un bon λ). Sa capacité thermique est très moyenne avec une faible masse volumique et un déphasage médiocre.

- La seconde matière

Matériau d'origine végétale avec une moins bonne conductivité thermique (donc un moins bon λ). La capacité thermique pour la laine du bois est excellente avec une masse volumique plus intéressante, et elle donne un déphasage excellent.

Le déphasage est donc variable en fonction du matériau.

c. Projection saisonnière et choix compatible des matériaux isolants

- En hiver

En vu d'assurer un bon déphasage, nous devons choisir un matériau d'une importante capacité thermique et de forte densité combinées avec une

bonne conductivité thermique. Ces caractéristiques favorisent une plus grande quantité de calories dans une paroi opaque, et génèrent par la suite une plus grande stabilité de la température intérieure. C'est au cours de ce processus qu'on peut avoir et observer l'avantage du déphasage. Dans ce cas, le confort s'améliore en économisant en même temps une part importante d'énergie due au chauffage.

- En été

Le déphasage thermique a principalement son importance en période estivale notamment lorsqu'on veut projeter une isolation par l'extérieur (pour éliminer les ponts thermiques). En sélectionnant un matériau isolant conforme, caractérisé par une bonne inertie thermique donc un bon déphasage, les températures intérieures peuvent se maintenir malgré les fortes variations des températures extérieures.

Nous comparons le fonctionnement de deux matériaux courants: la laine de bois et la laine de verre.

La conductivité de la laine de bois est de 0.040 W/m/K . En se référant par exemple à une toiture exposée intensivement aux rayonnements solaires d'été. L'épaisseur d'isolation convenable qui permet de retenir une résistance thermique de $6 \text{ m}^2 \text{ K W}^{-1}$ est de 23 cm. Par calcul, 24 cm donne un déphasage un peu supérieur à 12 heures.

Pour avoir la même résistance, on peut intégrer une épaisseur de 19 cm de la laine de verre qui se caractérise par une conductivité de 0.032 W/m/K , sachant que 20 cm donne un déphasage d'environ 5 heures.

Selon le principe de Carnot, le froid attire le chaud, et que l'été, le jour, il fait plus chaud dehors que dedans, ceci à partir d'environ 10 heures.

Avec la laine de bois les premières calories auront fini de traverser 12 heures plus tard donc vers 22 heures. Donc, rien ne va se passer. A cette heure là, la nuit arrive et il fera plus froid à l'extérieur qu'à l'intérieur. Puisque le froid attire le chaud, les calories stockées pendant la journée, vont être évacuées et elles seront à nouveau opérationnelles le lendemain matin. L'espace à vivre sera donc confortable toute la nuit.

En cas de la laine de verre, les calories pénétreront dès 15 heures et ce jusque vers 21 ou 22 heures, c'est-à-dire pendant 5 à 6 heures. Forcément la température intérieure montra, les calories se stockeront dans tous les éléments de la maison. Il faudra attendre qu'elles repartent avant que la maison ne redevienne confortable à partir de 1 heure ou 2 heures du matin.

Nous déduisons que le confort est infiniment insuffisant en intégrant 20 cm de la laine de verre. On peut distinguer deux solutions qui peuvent contrer cette situation.

Soit climatiser avec un coût d'installation et une consommation induits tout en assumant l'aberration du système.

La deuxième solution consiste bien sûr à assurer un même déphasage (12 heures). Pour y parvenir, il faudrait insuffler l'ouate de cellulose (25 cm) presque comme pour la laine de bois, 45 cm de la laine de roche, 65 cm de la laine de verre, 48 cm du polyuréthane ou 68 cm du polystyrène.

Ces résultats nous indiquent clairement le bon choix du matériau isolant et l'importance de son déphasage [55].

d. Performances des murs et comparaison des isolants

Pour diminuer les déperditions thermiques d'une habitation, il est indispensable de les protéger par une bonne isolation thermique (de préférence extérieure). L'objectif donc est de créer une enveloppe isolante avec des ponts thermiques presque entièrement éliminés. Les ponts sont dus principalement à des jonctions entre façade/refends, façade/toiture et façade/ouvertures.

Les travaux de Guechhati et al. [56] se sont focalisés sur certaines solutions envisageables pour améliorer l'efficacité énergétique d'un centre psychopédagogique à Oujda. Ils ont prouvé que la toiture est parmi les sources principales de déperdition thermique. Dans un autre [57], il est indiqué que la brique creuse est mieux adapté par rapport au parpaing et à la pierre lourde [55].

Le tableau I.2 donne en chiffre une comparaison globale des isolants cités auparavant. Les données ont été extraites de la maison écologique n°49 (Habitat Naturel HS n°10) référenciée par [58].

Nous désignons par :

La capacité hygroscopique : la capacité d'un matériau à absorber le surplus de vapeur d'eau quand l'air est trop humide et à le restituer lorsqu'il s'assèche.

Le coefficient de résistance à la diffusion de la vapeur d'eau (μ [mu]) : la capacité d'un matériau à laisser se diffuser la vapeur d'eau. Plus μ est élevé et moins la vapeur d'eau peut traverser la paroi. Une petite valeur de μ correspond donc à une paroi très perspirante.

Le classement au feu : la classe A regroupe des produits ne contribuant pas ou très peu au développement du feu. La classe F regroupe des matériaux n'ayant démontré aucune performance contre la propagation du feu.

1 : Mur

2 : Plancher / Combles perdus

3 : Rampant

4 : Support de couverture

5 : Sol sous chape

x : Utilisable

x : Non utilisable

Tableau I.2 : Comparatif global des isolants.

Dénomination	Famille	Conditionnement	Utilisation					Caractéristiques isolantes			Caractéristiques techniques				
			1	2	3	4	5	Lambda en W/m.K	Epaisseur pour R=5	Prix moyen public	Masse volumique en kg/m ³	Capacité Hygroscopique	Résistance à la vapeur d'eau	Classement au feu	Déphasage pour 20 cm
Polystyrène expansé PSE	Isolant synthétique	Panneau	x	x	x	x	x	0.032 à 0.038	16 à 19	5,6 €/m ² (ép. 6 cm)	10 à 30	Non	20 à 100000	B	4 h
Polyuréthane	Isolant synthétique	Panneau	x	x	x	x	x	0.024 à 0.030	12 à 15	5 €/m ² (ép. 7 cm)	20 à 40	Non	30 à 200	C	6 h
Laine de verre	Isolant minéral	Rouleau	x	x	x	x	x	0.032 à 0.042	16 à 21	3 €/m ² (ép. 10 cm)	10 à 40	Non	1	A	4 h
Bois	Isolants végétal	Fibre souple (laine)	x	x	x	x	x	0.038	19	11 à 13 €/m ² (ép. 10 cm)	45 à 55	Faible	1 à 2	E	7 h
		Fibre rigide (panneau haute densité)	x	x	x	x	x	0.045	23	26 à 37 €/m ² (ép. 10 cm)	160 à 270	Faible	3 à 5	E	15 h
Ouate de cellulose	Isolant issu du recyclage	Vrac insufflé sous pression	x	x	x	x	x	0.038 à 0.044	19 à 22	14 €/m ² (200L)	23 à 45	Moyenne	1 à 2	B	10 h
		Vrac projeté à sec	x	x	x	x	x	0.037 à 0.040	18 à 20	14 €/m ² (200L)	23 à 45	Moyenne	1 à 2	B	10 h
		Panneau	x	x	x	x	x	0.039	20	16 à 20 €/m ² (ép. 10 cm)	70 à 100	Moyenne	2	E	12 h

I.5. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté une revue bibliographique succincte sur les modèles de prédiction du rayonnement solaire. Nous avons dressé ensuite, un état d'art sur les principaux concepts actifs et passifs et leurs applications dans le secteur résidentiel. Les principales conclusions découlant de cet état sont les suivantes:

- Les modèles non linéaires sont les plus précis pour l'estimation du rayonnement solaire.
- Les systèmes intelligents sont rarement utilisés dans des applications photovoltaïques. Ils ont comme objectif de gérer l'énergie électrique dans les habitats à fin de réduire la consommation électrique.
- Les besoins de chauffage sont réduits grâce à une amélioration de l'isolation thermique, une réduction des ponts thermiques et un bon déphasage.
- L'intégration des concepts passifs ou actifs pour les résidences familiales va réduire la consommation énergétique de l'édifice.
- Cette revue nous a permis de mettre en évidence les solutions à adopter et de cibler les points forts et faibles permettant de transformer des bâtiments énergivores à des bâtiments basse consommation.

Références

1. S. Bendara, Stratégies de contrôle passif pour l'amélioration du confort thermo-Aéraulique des bâtiments multizones, thèse de Doctorat en Sciences Spécialité Physique énergétique, Université Abou-Bekr Belkaid, Tlemcen, Juin 2019.
2. F. Yettou, A. Malek, M. Haddadi, A. Gama, Etude comparative de deux modèles de calcul du rayonnement solaire par ciel clair en Algérie, Revue des Energies Renouvelables, vol 12 (2), 331 – 346, 2009.
3. M.R. Yaïche, S.M.A. Bekkouche, Estimation du rayonnement solaire global en Algérie pour différents types de ciel, Revue des Energies Renouvelables, Vol 13 (4), 683 – 695, 2010.

4. K. Gairaa, S. Benkacali, Analysis of solar radiation measurements at Ghardaïa area, south Algeria, *Energy Procedia*, vol 6, 122–129, 2011.
5. M. Mesri-Merad, I. Rougab, A. Cheknane, N.I. Bachari, Estimation du rayonnement solaire au sol par des modèles semi-empiriques, *Revue des Energies Renouvelables*, vol 15 (3), 451 – 463, 2012.
6. Q. Dai, X. Fang, A simple model to predict solar radiation under clear sky conditions, *Advances in Space Research*, vol 53 (8), 1239–1245, 2014.
7. T.E. Boukelia, M.S. Mecibah, I.E. Meriche, General models for estimation of the monthly mean daily diffuse solar radiation (Case study: Algeria), *Energy Conversion and Management*, vol 81, 211–219, 2014.
8. Y. El Mghouchi, A. El Bouardi, Z. Choulli, T. Ajzoul, New model to estimate and evaluate the solar radiation, *International Journal of Sustainable Built Environment*, vol 3 (2), 225–234, 2014.
9. A. Teke, H.B. Yıldırım, Ö. Çelik, Evaluation and performance comparison of different models for the estimation of solar radiation, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol 50, 1097–1107, 2015.
10. Y. El Mghouchi, A. El Bouardi, Z. Choulli, T. Ajzoul, Models for obtaining the daily direct, diffuse and global solar radiations, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol 56, 87–99, 2016.
11. N. Saifi, Contribution à la conception des bâtiments à faible consommation d'énergie dans les zones arides, thèse de Doctorat en Sciences Spécialité Génie des Procédés, Université Kasdi Merbah, Ouargla, Janvier 2016.
12. B. Zhou, W. Li, K.W. Chan, Y. Cao, Y. Kuang, X. Liu, X. Wang, Smart home energy management systems: Concept, configurations, and scheduling strategies, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol 61, 30–40, 2016.
13. J. Okae, J. Du, E.K. Akowuah, G. Appiah, E.K. Anto, The Design and Realization of Smart Energy Management System based on Supply-Demand Coordination, *IFAC-PapersOnLine*, vol 50 (1), 195–200, 2017.
14. M. Li, W. Gu, W. Chen, Y. He, Y. Wu, Y. Zhang, Smart home: Architecture, Technologies and Systems, *Procedia Computer Science*, vol 131, 393–400, 2018.

15. J. Nakoul, N. Bibi-Triki, A. Kherrous, M.Z. Bessenouci, S. Khelladi, Optimization of a solar photovoltaic applied to greenhouses, *Physics Procedia*, vol 55, 383 – 389, 2014.
16. A. Gama, Etude et réalisation d'un banc d'essai hybride photovoltaïque thermodynamique, thèse de Magister, École Nationale Supérieure Polytechnique, El-Harrach, Alger, 2007.
17. A. Al-salaymeh, Z. Al-hamamre, F. Sharaf, M.R. Abdelkader, Technical and economical assessment of the utilization of photovoltaic systems in residential buildings: the case of Jordan, *Energy Conversion and Management*, vol 51 (8), 1719–1726, 2010.
18. S.G. Chen, An efficient sizing method for a stand-alone PV system in terms of the observed block extremes, *Applied Energy*, vol 91 (1), 375–384, 2012.
19. S. Semaoui, A.H. Arab, S. Bacha, B. Azoui, Optimal sizing of a stand-alone photovoltaic system with energy management in isolated areas, *Energy Procedia*, vol 36, 358–368, 2013.
20. J. Haller, S. Voswinkel, V. Wesselak, The effect of quantum efficiencies on the optimum orientation of photovoltaic modules – A comparison between crystalline and thin film modules, *Solar Energy*, vol 88, 97 – 103, 2013.
21. H.A. Kazem, T. Khatib, K. Sopian, Sizing of a standalone photovoltaic/battery system at minimum cost for remote housing electrification in Sohar, Oman, *Energy and Buildings*, vol 61, 108–115, 2013.
22. A.E. Fathi, L. Nkhaili, A. Bennouna, A. Outzourhit, Performance parameters of a standalone PV plant, *Energy Conversion and Management*, vol 86, 490–495, 2014.
23. O. Erdinc, N.G. Paterakis, I.N. Pappi, A.G. Bakirtzis, J.P.S. Catalão, A new perspective for sizing of distributed generation and energy storage for smart households under demand response, *Applied Energy*, vol 143, 26–37, 2015.
24. A. Martinez-Rubio, F. Sanz-Adan, J. Santamaria, Optimal design of photovoltaic energy collectors with mutual shading for pre-existing building roofs, *Renewable Energy*, vol 78, 666–678, 2015.
25. S. Mandelli, C. Brivio, E. Colombo, M. Merlo, A sizing methodology based on levelized cost of supplied and lost energy for off-grid rural electrification systems loss of load probability, *Renewable Energy*, vol 89, 475–488, 2016.

26. H. Belmili, S. Boulouma, B. Bendib, M.F. Almi, Optimized control and sizing of standalone PV-Wind energy conversion system, *Energy Procedia*, vol 107, 76–84, 2017.
27. E.T. El Shenawy, A.H. Hegazy, M. Abdellatef, Design and optimization of stand-alone PV system for Egyptian rural communities, *International Journal of Applied Engineering Research*, vol 12 (20), 10433-10446, 2017.
28. K. Javed, H. Ashfaq, R. Singh, Optimized load profile & Cost analysis of stand-alone photovoltaic system for rural power applications in Indian scenario, *Smart Science*, vol 6 (3), 245-255, 2018.
29. M. Hayek, J. Assaf, W. Lteif, Experimental investigation of the performance of evacuated tube solar collectors under Eastern Mediterranean climatic conditions, *Energy Procedia*, vol 6, 618–626, 2011.
30. M. Mahendran, G.C. Lee, K.V. Sharma, A. Shahrani, R.A. Bakar, Performance of evacuated tube solar collector using water-based titanuim oxide nanofluid, *Journal of Mechanical Engineering and Sciences*, vol 3, 301-310, 2012.
31. L.M. Ayompe, A. Duffy, Thermal performance analysis of a solar water heating system with heat pipe evacuated tube collector using data from a field trial, *Solar Energy*, vol 90, 17–28, 2013.
32. X. Zhang, S. You, H. Ge, Y. Gao, W. Xu, M. Wang, T. He, X. Zheng, Thermal performance of direct-flow coaxial evacuated-tube solar collectors with and without a heat shield, *Energy Conversion and Management*, vol 84, 80-87, 2014.
33. Y. Tong, H. Cho, Comparative study on the thermal performance of evacuated solar collectors with U-Tubes and heat pipes, *International Journal of Air-Conditioning and Refrigeration*, vol 23 (3), 1-14, 2015.
34. M. Azimi, S.S. Mirjavadi, A.M. Karim, Simulation and optimization of vacuum tube solar collector water heating system in Iran, *Journal of Science and Engineering*, vol 7 (1), 1-19, 2016.
35. L. Gill, J.M. Mahon, K. Ryan, The performance of an evacuated tube solar hot water system in a domestic house throughout a year in a northern maritime climate (Dublin), *Solar Energy*, vol 137, 261-272, 2016.
36. A.E. Kabeel, M.M.K. Dawood, A.I. Shehata, Augmentation of thermal efficiency of the glass evacuated solar tube collector with coaxial heat pipe with different refrigerants and filling ratio, *Energy Conversion and Management*, vol 138, 286-298, 2017.

37. M. Jowzi, F. Veysi, G. Sadeghi, Novel experimental approaches to investigate distribution of solar insolation around the tubes in evacuated tube solar collectors, *Renewable Energy*, vol 127, 724-732, 2018.
38. M.B. Elsheniti, A. Kotb, O. Elsamni, Thermal performance of a heat-pipe evacuated-tube solar collector at high inlet temperatures, *Applied Thermal Engineering*, vol 154, 315-325, 2019.
39. M.M. Sarafraz, I. Tlili, Z. Tian, M. Bakouri, M.R. Safaei, Smart optimization of a thermosyphon heat pipe for an evacuated tube solar collector using response surface methodology (RSM), *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, vol 534, 1-12, 2019.
40. A.R.I. Amarala, E. Rodriguesa, A.R. Gaspara, Á. Gomes, J. Breckling, A thermal performance parametric study of window type, orientation, size and shadowing effect, *Sustainable Cities and Society*, vol 26, 456-465, 2016.
41. K.J. Kontoleon, Glazing solar heat gain analysis and optimization at varying orientations and placements in aspect of distributed radiation at the interior surface, *Applied Energy*, vol 144, 152-164, 2015.
42. R. Bruno, G. Oliveti, N. Arcuri, An analytical model for the evaluation of the correction factor FW of solar gains through glazed surfaces defined in EN ISO 13790, *Energy and Buildings*, vol 96, 1-19, 2015.
43. Y. Wang, Y. Chen, Modeling and calculation of solar gains through multi-glazing facades with specular reflection of venetian blind, *Solar Energy*, vol 130, 33-45, 2016.
44. M. Thalfeldt, J. Kurnitski, H. Volla, Detailed and simplified window model and opening effects on optimal window size and heating need, *Energy and Buildings*, vol 127, 242-251, 2016.
45. S. Semahi, B. Djebri, La conception des logements à haute performance énergétique (HPE) en Algérie - Proposition d'un outil d'aide à la conception dans les zones arides et semi-arides, *Revue des Energies Renouvelables*, vol 16 (3), 551 - 568, 2013.
46. S.M.A. Bekkouche, T. Benouaz, M.R. Yaiche, M.K. Cherier, M. Hamdani, F. Chellali, Introduction to control of solar gain and internal temperatures by thermal insulation, proper orientation and eaves, *Energy and Buildings*, vol 43, 2414-2421, 2011.
47. Guide bâtiment durable. brussels, Limiter les gains solaires. Site web: <https://www.guidebatimentdurable.brussels/fr/limiter-les-gains-solaires?IDC=10536>, accessible en juin 2020.

48. J. Allegrini, V. Dorer, J. Carmeliet, Influence of the urban microclimate in street canyons on the energy demand for space cooling and heating of buildings, *Energy and Buildings*, vol 55, 823-832, 2012.
49. S.M.A. Bekkouche, T. benouaz, M.K. Cherier, M. Hamdani, M.R. Yaiche, N. Benamrane, Influence of the compactness index to increase the internal temperature of a building in Saharan climate, *Energy and Buildings*, vol 66, 678-687, 2013.
50. S. Bendara, S.M.A. Bekkouche, T. Benouaz, S. Belaid, M. Hamdani, M.K. Cherier, A. Boutelhig, N. Benamrane, Energy efficiency and economic insulation thickness according to the compactness measure Case of a studio apartment under Saharan weather conditions, *Journal of Solar Energy Engineering : Including Wind Energy and Building Energy Conservation*, January 2019 Copyright@2019 by ASME, doi:10.1115/1.4042455.
51. S.M.A. Bekkouche, T. Benouaz, M. Hamdani, M.K. Cherier, M.R. Yaiche, N. Benamrane, Judicious choice of the building compactness to improve thermo-aeraulic comfort in hot climate, *Journal of Building Engineering*, 01, 42-52, 2015.
<https://doi.org/10.1016/j.jobe.2015.03.002>.
52. S.M.A. Bekkouche, T. Benouaz, M. Hamdani, M.K. Cherier, M.R. Yaiche, N. Benamrane, Modelling and experiment of buildings thermo-aeraulic behaviour according to the level-compactness in Saharan climate conditions, *Engineering Structures and Technologies*, Taylor & Francis, 2016 8(3): 117-130, doi:10.3846/2029882X.2016.1211492.
53. Jean-Pierre Oliva, Samuel Courgey, *l'isolation thermique écologique Conception, matériaux, mise en œuvre*, 2^{eme} édition Éditeur : Terre vivante, Date de parution : 12/04/2010.
54. L'importance du déphasage thermique, une protection contre les surchauffes estivales. Site web:<http://www.tinatur.com/L-importance-du-dephasage-thermique.html>, accessible en juin 2020.
55. Papy claud, le déphasage thermique, c'est quoi ? site web : https://www.youtube.com/watch?v=A_Xc2qeaNig, accessible en juin 2020.
56. R. Guechhati, M. Moussaoui, A. Mezrhab, A. Mezrhab, Simulation de l'effet de l'isolation thermique des bâtiments Cas du centre psychopédagogique SAFAA à Oujda, *Revue des Energies Renouvelables* Vol. 13 N°2 (2010) 223 - 232.
57. S.M.A. Bekkouche, T. benouaz, M.K. Cherier, M. Hamdani, N. Benamrane, M.R. Yaiche, Thermal resistances of local building materials and their effect upon the interior temperatures case of a

building located in Ghardaia region, Construction and Building Materials, vol 52, 59-70, 2014.

58. Comparatif global des isolants,
<http://www.parc-ecohabitat.com/Files/30845/11264173150663.pdf>,
accessible en juin 2020.

Chapitre II

Méthode d'Evaluation et Prise en Compte des Apports Sociaux Gratuits

Chapitre II :

Méthode d'Évaluation et Prise en Compte des Apports Solaires Gratuits

II.1. Introduction

L'énergie solaire se caractérise par une absence de pollution; sa disponibilité a fait l'objet d'un grand intérêt ces dernières années. En effet, les systèmes d'exploitation qui utilisent cette forme d'énergie demandent une légère maintenance et présentent une bonne fiabilité de fonctionnement, une autonomie de plus en plus accrue, une résistance extrême aux conditions naturelles (température, humidité, vent, corrosion, etc.), et donc une grande longévité [1-4].

Le gisement solaire est un ensemble de données décrivant l'évolution du rayonnement solaire disponible dans un lieu donné et au cours d'une période donnée. Son évaluation peut se faire à partir des données de l'irradiation solaire globale. Elle est utilisée pour simuler le fonctionnement probable d'un système énergétique solaire et donc d'effectuer son dimensionnement le plus exact possible compte tenu des demandes en énergie à satisfaire [5, 6].

Ce chapitre s'organise autour de deux parties. Dans la première partie, nous avons proposé une étude sur les performances de certains modèles d'estimation du rayonnement solaire reçu au niveau du sol dans des conditions de ciel clair sur une surface horizontale et inclinée pour le site de Ghardaïa (Algérie). Les modèles empiriques choisis sont comparés aux données réelles issues de la station météorologique du site d'étude. En ce qui concerne la deuxième partie, nous essaierons de privilégier une orientation qui permet à la fois de maximiser la captation des apports solaires en hiver et réduire les consommations énergétique en cas de surchauffe. Nous nous intéressons à un logement soumis au régime climatique de Ghardaïa.

II.2. Rayonnement solaire

II.2.1. Nature du rayonnement solaire

Le rayonnement solaire est la lumière qui provient du soleil sous forme d'onde électromagnétique dont 98% d'énergie est comprise entre 0.25 et 4 μm de longueur, le reste représente 1% au-dessus et 1% au-dessous de cet intervalle.

La répartition d'énergie en fonction de la longueur d'onde est pour:

- o 0.25 μm < λ < 0.4 μm : c'est le domaine de l'ultraviolet (invisible), il représente 7% de l'énergie totale émise par le soleil.
- o 0.4 μm < λ < 0.8 μm : c'est le domaine du visible, il représente 47.5% de l'énergie totale émise par le soleil.
- o 0.8 μm < λ < 4 μm : c'est le domaine de l'infrarouge (invisible), il représente 45.5 % de l'énergie totale émise par le soleil.

Le rayonnement solaire est assimilable à celui d'un corps noir à la température $T_r = 2800$ K dans l'intervalle du spectre [0.25 μm \rightarrow 4 μm]. L'énergie rayonnée par le soleil n'est pas uniformément répartie pour toutes les longueurs d'onde, elle passe par un maximum pour une longueur d'onde donnée par la loi de WIEN [7]:

$$\lambda_{\max} T_r = 2898 \mu\text{m K} \quad (\text{II.1})$$

Pour : $T_r = 2800$ K $\Rightarrow \lambda_{\max} \approx 0.5 \mu\text{m}$

L'éclairement correspond au flux lumineux Φ : c'est la puissance lumineuse reçue par unité de surface. Il est généralement exprimé en W/m^2 .

II.2.2. Constante solaire

La constante solaire est le flux énergétique du soleil reçu sur une unité de surface qu'est variable autour de l'année puisque la distance terre - soleil est elle-même variable. Pour notre cas, la valeur, exprimée par W/m^2 , qui a été retenue en 1980 est de :

$$G_{cs} = 1367 \quad (\text{II.2})$$

La correction de la distance terre-soleil est donnée par cette relation :

$$C_{t-s} = 1 + 0.034 \cos((360/365)(n - 2)) \quad (\text{II.3})$$

n : le numéro de jour dans l'année.

La constante solaire corrigée est [7, 8] :

$$G_0 = G_{cs} C_{t-s} \quad (\text{II.4})$$

II.2.3. Mesure du rayonnement solaire

Tous les appareils servant à mesurer les rayonnements naturels sont des radiomètres parfois aussi appelés optomètres.

Le rayonnement solaire possède une énergie reliée directement à la longueur d'onde par la constante de Planck et la célérité de la lumière. Le rayonnement solaire est l'ensemble du spectre de rayonnement émis par le soleil, c'est l'ensemble des longueurs d'onde λ comprises entre 0.3 et 3 μm . Il comprend les ultraviolets, le visible, le proche infrarouge et le moyen infrarouge. Lors de la traversée de l'atmosphère il est absorbé principalement par l'ozone, la vapeur d'eau et le gaz carbonique. Une partie de ce rayonnement arrive au sol de manière directionnelle, rayonnement direct, et une autre partie est diffusée par les molécules et les particules présentes dans l'atmosphère, rayonnement diffus. L'unité de mesure couramment utilisée est le W/m^2 [9].

Le nombre de mesures in-situ en Algérie, effectuées dans les stations météorologiques ou radiométriques est actuellement de 75 stations. C'est pourquoi, il est souhaitable de s'orienter vers une deuxième voie qui se base sur des modèles d'évaluation permettant d'extraire les différentes composantes du rayonnement solaire. La station radiométrique de l'URAER-Ghardaïa effectue des mesures instantanées pour les différentes composantes du rayonnement : le global G, le rayonnement diffus D et le rayonnement direct I.

Le site d'étude choisi est localisé dans le nord de la Sahara algérienne, Noumerat-Ghardaïa (latitude 32.48° Nord, longitude 3.80°

Est) est le chef-lieu de la wilaya, située à 600 km au sud d'Alger, elle est la capitale de la vallée du Mزاب et elle fait partie du patrimoine mondial, de par son architecture et son histoire. Les données sont collectées auprès d'une station radiométrique de bonne précision installée à l'Unité de Recherche Appliquée en Energie Renouvelable (figure II.1). Cette station dispose de deux parties : un composant fixe "pyranomètre de type EKO" pour la mesure du flux de rayonnement global sur un plan horizontal et une partie mobile munie d'un "pyrhéliomètre de type EKO" qui est en mesure de suivre le chemin du soleil du lever au coucher du soleil. Elle sert à mesurer la composante solaire directe reçue sur un plan normale. L'autre "pyranomètre EKO" mesure le flux de rayonnement diffus sur un plan horizontal. Le système est pourvu d'un corps noir de forme sphérique qui cache (création d'ombrage) le flux provenant directement du disque solaire. Les valeurs mesurées des composants solaires instantanés (diffus, directs et globaux) correspondent à un intervalle de cinq minutes [9].



Figure II.1 : La station radiométrique de l'Unité de Recherche Appliquée en Energie Renouvelable URAER-Ghardaïa.

II.3. Paramètres géométriques et atmosphériques

II.3.1. Paramètres géométriques

a. Déclinaison du soleil

C'est l'angle que fait la direction du soleil avec le plan équatorial de la terre. La déclinaison varie entre la valeur de -23.45° au solstice d'hiver à la valeur de $+23.45^\circ$ au solstice d'été et elle est nulle aux équinoxes. Elle est donnée par la formule suivante [8]:

$$d = 23.45 \sin\left(\frac{360}{365} (n + 284)\right) \quad (\text{II.5})$$

b. Angle horaire du soleil

C'est l'angle que font les projections de la direction du soleil avec la direction du méridien du lieu, l'angle horaire du soleil varie à chaque instant de la journée selon la relation [7, 8]:

$$H = 15 (TSV - 12) \quad (\text{II.6})$$

TSV : est le temps solaire vrai, égale au temps légal corrigé par un décalage dû à l'écart entre la longitude du lieu et la longitude de référence. Il est exprimé par la formule suivante :

$$TSV = TL - DE + \frac{E_t + 4L}{60} \quad (\text{II.7})$$

L : Longitude du lieu, en degrés.

E_t : la correction de l'équation de temps qui est calculée à partir de cette équation :

$$E_t = 9.87 \sin(2N) - 7.53 \cos(N) - 1.5 \sin(N) \quad (\text{II.8})$$

$$N = \frac{360}{365} (n - 81) \quad (\text{II.9})$$

c. Lever et coucher du soleil

A partir de la hauteur angulaire du soleil, on peut déduire les heures de lever et de coucher du soleil selon l'équation suivante :

$$t_{\text{lever}} = 12 + \frac{H_{\text{lever}}}{15} + DE - \frac{Et + 4L}{60} \quad (\text{II.10})$$

$$t_{\text{coucher}} = 12 + \frac{H_{\text{coucher}}}{15} + DE - \frac{Et + 4L}{60} \quad (\text{II.11})$$

L'angle horaire au lever ($-H_{\text{coucher}}$) et au coucher (H_{coucher}) est donné par cette équation [7]:

$$H_{\text{coucher}} = \cos^{-1}(-\tan(d) \tan(\varphi)) \quad (\text{II.12})$$

φ : Latitude du lieu, en degrés.

d. Durée d'insolation

Elle se calcule par l'une des expressions suivantes :

$$D = \frac{2}{15} H_{\text{coucher}} \quad (\text{II.13})$$

$$D = t_{\text{coucher}} - t_{\text{lever}} \quad (\text{II.14})$$

e. Hauteur du soleil

C'est l'angle que fait le plan horizontal avec la direction du soleil, la valeur $h_s = 0$ correspond au lever et au coucher du soleil, la hauteur du soleil varie entre $+90^\circ$ (zénith) et -90° (nadir). L'expression générale est donnée comme suit [7, 8]:

$$\sin(h_s) = \cos(\varphi) \cos(d) \cos(H) + \sin(\varphi) \sin(d) \quad (\text{II.15})$$

f. Azimut du soleil

C'est l'angle que fait, sur le plan horizontal, la projection de la direction du soleil avec la direction du sud. L'azimut est compris entre -180° et 180° . L'azimut du soleil est représenté en fonction de la déclinaison solaire (d), latitude du lieu (φ), et de l'angle horaire (H) de la manière suivante [8]:

$$\sin(\delta_s) = \frac{\cos(d) \sin(H)}{\cos(h_s)} \quad (\text{II.16})$$

g. Angle d'incidence

L'angle d'incidence sur un plan est défini par l'angle entre la direction du soleil et la normale du plan. Cet angle, en coordonnées horizontales, est déterminé par la connaissance des cosinus des rayons incidents avec la normale. Il dépend de plusieurs paramètres: l'azimut du plan δ_{plan} ,

l'azimut de soleil δ_s , la hauteur de plan h_{plan} , la hauteur du soleil h_s conformément à la relation ci-dessous [8]:

$$\cos(i) = \sin(\delta_{\text{plan}} - \delta_s) \cos(h_{\text{plan}}) \cos(h_s) - \sin(h_{\text{plan}}) \sin(h_s) \quad (\text{II.17})$$

$$h_{\text{plan}} = 90 - \beta \quad (\text{II.18})$$

β : Inclinaison du plan, en degrés.

L'angle d'incidence en coordonnées horaires s'écrit de la manière suivante :

$$\begin{aligned} \cos(i) = & \sin(\delta_{\text{plan}}) \cos(h_{\text{plan}}) \sin(H) \cos(d) + \cos(\delta_{\text{plan}}) \cos(h_{\text{plan}}) \\ & (\cos(H) \cos(d) \sin(\varphi) - \sin(d) \cos(\varphi)) + \sin(h_{\text{plan}}) \\ & (\cos(H) \cos(d) \cos(\varphi) - \sin(d) \sin(\varphi)) \end{aligned} \quad (\text{II.19})$$

II.3.2. Paramètres atmosphériques

a. Facteur de trouble de Linke

Le facteur de trouble total de Linke T est défini comme étant le nombre d'atmosphères pures et sèches (sans aérosols, ni vapeur d'eau, ni nuages) manifestant uniquement une absorption, et une diffusion par les gaz "constants" de l'atmosphère qu'il faudrait accumuler pour provoquer la même atténuation totale du rayonnement direct que l'atmosphère réelle, poussiéreuse et humide, et ceci pour un lieu donné à une date et à un instant quelconque considéré.

Le facteur de trouble T est considéré en fonction des caractéristiques climatiques locales du site et de la hauteur du soleil, définie par la somme des trois facteurs de trouble auxiliaires T_1 , T_2 et T_3 :

T_1 : est le trouble dû à l'absorption gazeuse tant par les constituants fixes de l'atmosphère que par l'ozone et surtout par la vapeur d'eau. Une modélisation de ce facteur en fonction des seuls paramètres géo-astronomiques a permis à Capderou [10-12] de proposer l'expression suivante :

$$T_1 = 2.4 - 0.9 \sin(\varphi) + 0.1 (2 + \sin(\varphi)) A_{he} - 0.2 z - (1.22 + 0.14 A_{he}) (1 - \sin(h_s)) \quad (II.20)$$

z : L'altitude de lieu (km), $z = 450$ m pour le site de Ghardaïa.

A_{he} est donné par la relation suivante :

$$A_{he} = \sin\left(\frac{360}{365} (n - 121)\right) \quad (II.21)$$

T_2 est le trouble correspondant à l'absorption par les gaz de l'atmosphère (O_2 , CO_2 et O_3) et à la diffusion moléculaire de Rayleigh, il est donné par l'approche suivante:

$$T_2 = 0.89^z \quad (II.22)$$

T_3 est le trouble relatif à la diffusion par les aérosols couplés à une légère absorption, il dépend à la fois de la nature et de la quantité des aérosols. T_3 est donné par:

$$T_3 = (0.9 + 0.4 A_{he}) 0.63^z \quad (II.23)$$

b. Masse atmosphérique

On appelle masse d'air (m) la masse d'atmosphère traversée par le rayonnement direct pour atteindre le sol (par ciel clair), par rapport à une traversée verticale au niveau de la mer. Plus le soleil est bas sur l'horizon, plus il va traverser une épaisseur importante d'atmosphère et plus il va subir des transformations. R-sun a utilisé la formule suivante [1]:

$$m = \frac{p}{\sin(h_0) + 0.50572 (h_0 + 6.07995)^{-1.6364}} \quad (II.24)$$

P est la correction de l'altitude de lieu qu'on peut calculer comme suit:

$$p = e^{-\frac{z}{8434.5}} \quad (II.25)$$

h_0 est la correction de la hauteur du soleil qui est définie par cette relation :

$$h_0 = h_s + \frac{0.061359 (0.1594 + 1.123 h_s + 0.065656 h_s^2)}{1 + 28.9344 h_s + 277.3971 h_s^2} \quad (II.26)$$

c. Épaisseur optique de l'atmosphère

En 1922, Linke [10] a défini l'épaisseur optique de Rayleigh comme étant l'épaisseur d'une atmosphère sans nuages, vapeur d'eau et aérosols.

Pour $m < 20$

$$\delta_R = \frac{1}{6.6296 + 1.7513 m - 0.1202 m^2 + 0.0065 m^3 - 0.00013 m^4} \quad (\text{II.27})$$

Si $m > 20$

$$\delta_R = \frac{1}{10.4 + 0.718 m} \quad (\text{II.28})$$

II.4. Modèles de calcul de l'éclairement solaire

Rappelons que le rayonnement solaire étant mesuré sur un nombre limité de sites, les données relatives à cette énergie donc ne sont pas toujours disponibles. L'utilisation des modèles approchés est pratiquement le seul moyen pour pallier à ce problème.

II.4.1. Approche de Capderou

L'absorption et la diffusion causées par les constituants de l'atmosphère peuvent être exprimées par des facteurs de trouble. A partir de ces facteurs, il est possible d'exprimer les irradiances directes et diffuses par ciel clair.

a. Éclairement direct incident sur un plan horizontal par ciel clair

L'éclairement direct I_{dir} par ciel clair obtenu sur un plan horizontal est donné par la relation suivante [8]:

$$I_{dir} = G_0 \sin(h_s) e^{-\frac{T}{0.9 + \frac{9.4}{0.89^z} \sin(h_s)}} \quad (\text{II.29})$$

b. Éclairement diffus incident sur un plan horizontal par ciel clair

L'éclairement diffus incident sur un plan horizontal I_{dif} est donné par cette équation [8]:

$$I_{dif} = G_{cs} e^{-1 + 1.06 \log(\sin(h_s))} + a_1 - \sqrt{a_1^2 + b_1^2} \quad (\text{II.30})$$

$$b_1 = \log (T - T_1) - 2.8 + 1.02 (1 - \sin (h_s))^2$$

$$a_1 = 1.1 \quad (\text{II.31})$$

L'éclairement global reçu sur un plan horizontal est donné par :

$$I_{\text{glob}} = I_{\text{dir}} + I_{\text{dif}} \quad (\text{II.32})$$

c. Eclairement direct incident sur un plan incliné par ciel clair

L'éclairement direct reçu par un plan incliné est la projection de la composante normale sur un plan incliné qui est défini par l'expression suivante [8]:

$$I_{\text{dir-inc}} = G_0 \cos(i) e^{-\frac{T}{0.9 + \frac{9.4}{0.89^z} \sin(h_s)}} \quad (\text{II.33})$$

d. Eclairement diffus incident sur un plan incliné par ciel clair

L'éclairement diffus incident sur un plan incliné est donné par [8]:

$$I_{\text{dif-inc}} = d_{\text{ciel}} + d_{\text{sol}} + \delta'_i \frac{1 + \sin(\delta_{\text{plan}})}{2} \quad (\text{II.34})$$

δ'_i est par définition l'éclairement diffus rétrodiffusé, c'est à dire celui diffusé à nouveau par le ciel vers le sol et donné par cette expression :

$$\delta'_i = 0.9 (r_0 - 0.2) I_{\text{glob}} e^{-4 (T - T_1)^{-0.5}} \quad (\text{II.35})$$

r_0 est l'albédo de sol.

d_{ciel} est l'éclairement diffus incident en provenance du ciel qui est défini comme suite :

$$d_{\text{ciel}} = \delta_d \cos(i) + \delta_i \frac{1 + \sin(\delta_{\text{plan}})}{2} + \delta_h \cos(\delta_{\text{plan}}) \quad (\text{II.36})$$

δ_d est la composante directe circumsolaire qui est donnée par les expressions suivantes :

$$a_2 = 3.1 - 0.4 b_2$$

$$b_2 = \log (T - T_1) - 2.28 - 0.5 \log (\sin (h_s)) \quad (\text{II.37})$$

$$\delta_d = G_0 e^{-2.48 + \sin(h_s) + a_2 - \sqrt{a_2^2 + 4 b_2^2}}$$

δ_i est la composante isotrope correspondant à un ciel de luminance uniforme et qui est donnée par :

$$\delta_i = I_{\text{dif}} - \delta_d \sin(h_s) \quad (\text{II.38})$$

δ_h est la composante diffuse en provenance du cercle de l'horizon qui est définie par les équations suivantes :

$$\begin{aligned} a_3 &= \log(T - T_1) - 3.1 - \log(\sin(h_s)) \\ b_3 &= e^{0.2 + 1.75 \log(\sin(h_s))} \\ \delta_h &= \frac{-0.02 G_0}{a_3^2 + a_3 b_3 + 1.8} e^{\sin(h_s)} \end{aligned} \quad (\text{II.39})$$

d_{sol} est le diffus de sol

$$d_{\text{sol}} = r_0 I_{\text{glob}} \frac{1 - \sin(\delta_{\text{plan}})}{2} \quad (\text{II.40})$$

L'éclairement global incident, à un instant donné sur un plan de coordonnées δ_{plan} et β est donné par l'expression finale suivante [8]:

$$I_{\text{glob-inc}} = I_{\text{dir-inc}} + I_{\text{dif-inc}} \quad (\text{II.41})$$

II.4.2. Modèle de Perrin

Tout rayonnement incident sur terre va être décomposé en plusieurs rayonnements. Ces derniers varient en fonction de la hauteur du soleil, de l'angle d'incidence, des intempéries et de l'état de visibilité de l'atmosphère. La modélisation théorique des éclairagements solaires est très compliquée, ils sont en fonction des variations climatiques et des intempéries.

Pour un ciel clair, les rayonnements solaires diffus et global, reçus sur un plan horizontal sont donnés par [8] :

$$I_{\text{dif}} = A' (\sin(h_s))^{0.4} \quad (\text{II.42})$$

$$I_{\text{glob}} = A'' (\sin(h_s))^{B''} \quad (\text{II.43})$$

Les éclairagements solaires direct, diffus et global incidents sur un capteur incliné sont donnés par les formules suivantes:

$$I_{\text{dir-inc}} = A \cos(i) e^{-\frac{1}{B \sin(h_s + 2)}} \quad (\text{II.44})$$

$$I_{\text{dif-inc}} = \frac{1 + \cos(\beta)}{2} I_{\text{dif}} + \frac{1 - \cos(\beta)}{2} \rho I_{\text{glob}} \quad (\text{II.45})$$

ρ : étant l'albédo du sol donné par :

$$\rho = \begin{cases} 0.2 \text{ à } 0.4 & \text{\& verdure} \\ 0.4 \text{ à } 0.8 & \text{\& sol clair} \\ 0.8 \text{ à } 0.9 & \text{\& neige} \end{cases} \quad (\text{II.46})$$

Les constantes A , B , A' , A'' , B'' dépendent de l'état de l'atmosphère comme le montre le tableau II.1 :

Tableau II.1 : Valeurs retenues des paramètres décrivant l'état de l'atmosphère.

L'état de l'atmosphère	A	B	A'	A''	B''
Ciel bleu foncé	1300	6	87	1150	1.15
Ciel bleu clair	1230	4	125	1080	1.22
Ciel bleu laiteux	1200	2.5	187	990	1.25

II.4.3. Modèle de R.sun

Le rayonnement direct incident sur un plan horizontal par ciel clair est donné par l'équation suivante [11]:

$$I_{\text{dir}} = G_0 \sin(h_s) e^{-0.8662 T_m \delta_r} \quad (\text{II.47})$$

Le rayonnement diffus incident sur une surface horizontale par ciel clair est donné par cette équation [11]:

$$I_{\text{dif}} = G_0 T_n F_d \quad (\text{II.48})$$

T_n est le facteur de trouble de Linke corrigé et qui est défini par :

$$T_n = -0.015843 + 0.030543 T + 0.0003797 T^2 \quad (\text{II.49})$$

F_d est la fonction de l'altitude solaire, elle est donnée par l'expression:

$$F_d = A_1 + A_2 \sin(h_s) + A_3 \sin^2(h_s) \quad (\text{II.50})$$

A_1 , A_2 et A_3 : sont des coefficients dépendants uniquement du facteur de trouble de Linke corrigé, définis par les expressions suivantes [11]:

$$A_1 = \begin{cases} \frac{0.0022}{T_n} & \text{si } R < 0.0022 \\ A'_1 & \text{si } R \geq 0.0022 \end{cases} \quad (\text{II.51})$$

$$A'_1 = 0.26463 - 0.061581 T + 0.0031408 T^2 \quad (\text{II.52})$$

$$R = A'_1 T_n \quad (\text{II.53})$$

$$A_2 = 2.04020 + 0.018945 T - 0.011161 T^2 \quad (\text{II.54})$$

$$A_3 = -1.3025 + 0.039231 T - 0.0085079 T^2 \quad (\text{II.55})$$

L'éclairement global sur un plan horizontal est calculé comme suit :

$$I_{\text{glob}} = I_{\text{dir}} + I_{\text{dif}} \quad (\text{II.56})$$

Le rayonnement direct reçu par un plan incliné est obtenu en utilisant l'équation suivante [11]:

$$I_{\text{dir-inc}} = \frac{I_{\text{dir}} \sin(E_{\text{exp}})}{\sin(h_s)} \quad (\text{II.57})$$

E_{exp} est l'angle d'incidence solaire mesuré entre le soleil et une surface inclinée, donné par la relation suivante :

$$\sin(E_{\text{exp}}) = \cos(\varphi'_i) \cos(d) \cos(H - \lambda_i) + \sin(\varphi'_i) \sin(d) \quad (\text{II.58})$$

$$\sin(\varphi'_i) = -\cos(\varphi) \sin(\beta) \cos(\delta_{\text{plan}}) + \sin(\varphi) \cos(\beta) \quad (\text{II.59})$$

$$\tan(\lambda_i) = -\frac{\sin(\beta) \sin(\delta_{\text{plan}})}{\sin(\varphi) \sin(\beta) \cos(\delta_{\text{plan}}) + \cos(\varphi) \cos(\beta)} \quad (\text{II.60})$$

Le modèle d'estimation de l'éclairement diffus par ciel clair sur une surface inclinée est donné par les équations suivantes [11]:

$$I_{\text{dif-inc}} = I_{\text{dif}} F'_B \quad \text{si } h \geq 0, E_{\text{exp}} < 0 \quad (\text{II.61})$$

$$F'_B = r_i + N' (\sin(\beta) - \beta \cos(\beta) - 180 \sin^2(\beta/2)) \quad (\text{II.62})$$

$$r_i = \frac{1 + \cos(\beta)}{2} \quad (\text{II.63})$$

$$N' = 0.00263 - 0.712 K_b - 0.6883 K_b^2 \quad (\text{II.64})$$

$$K_b = \frac{I_{\text{dir}}}{G_{0h}} \quad (\text{II.65})$$

$$G_{0h} = G_0 \sin(h_s) \quad (\text{II.66})$$

L'éclairement global est donc la somme des deux éclairagements direct et diffus:

$$I_{\text{glob-inc}} = I_{\text{dir-inc}} + I_{\text{dif-inc}} \quad (\text{II.67})$$

II.5. Performance des modèles de calcul

Il s'ensuit qu'une étude comparative s'est achevée sur les éclairagements solaires globaux horizontaux et inclinés à 32° Sud. À ce propos, plusieurs journées ont été sélectionnées pour tester les résultats obtenus. Pour une meilleure évaluation, quelques indices statistiques ont fait l'objet de certains calculs menés.

L'erreur moyenne Er_{moy} , en anglais MBE "Mean Bias Error", quantifie l'écart moyen entre les valeurs mesurées et les valeurs simulées [2]. Cette erreur reflète la tendance d'ensemble de la grandeur simulée à sa surestimation ($Er_m > 0$) ou à sa sous-estimation ($Er_m < 0$).

$$Er_m = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (I_{\text{Calculé},i} - I_{\text{Mesuré},i}) \quad (\text{II.68})$$

N est le nombre de données mesurées.

L'erreur relative moyenne non algébrique, exprimée en pourcentage et donnée par l'équation suivante [2]:

$$Er_m(\%) = 100 \text{ moy} \frac{|I_{\text{Calculé},i} - I_{\text{Mesuré},i}|}{I_{\text{Mesuré},i}} \quad (\text{II.69})$$

L'erreur quadratique moyenne RMSE "Root Mean Square Error" que l'on note Er_{qm} . C'est une grandeur qui mesure l'amplitude de l'erreur, elle s'exprime comme suit [2]:

$$Er_{qm} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (I_{Calculé,i} - I_{Mesuré,i})^2}{N}} \quad (II.70)$$

$$Er_{qm}(\%) = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{(I_{Calculé,i} - I_{Mesuré,i})^2}{I_{Mesuré,i}^2}} \quad (II.71)$$

Le coefficient de corrélation R [2], obtenu par une corrélation quantifiant la correspondance temporelle des variations des champs simulés et celles mesurés. Il apporte une précieuse idée sur le comportement des simulations par rapport aux mesures. Plus la corrélation est élevée, plus les variations des simulations sont bien placées. Une bonne performance du modèle correspond une simulation munie à un coefficient de corrélation proche de 1.

$$R = \frac{\sum_{i=1}^N (I_{Calculé,i} - \text{moy}(I_{Calculé})) (I_{Mesuré,i} - \text{moy}(I_{Mesuré}))}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (I_{Calculé,i} - \text{moy}(I_{Calculé}))^2} \sqrt{\sum_{i=1}^N (I_{Mesuré,i} - \text{moy}(I_{Mesuré}))^2}} \quad (II.72)$$

A cet effet, six journées de ciel clair de l'année 2017 ont été testées : le 13 janvier, le 18 février, le 17 mars, le 15 mai, le 16 juillet et le 22 octobre. La figure II.2 apporte une description des courbes issue de la simulation simultanée de l'éclairement global horizontal selon les trois approches. La comparaison s'est effectuée en temps réel avec les valeurs collectées de la station radiométrique.

Les erreurs dues à la modélisation de l'éclairement par ciel clair peuvent être quantifiées en calculant les paramètres définis par les équations précédentes. Le tableau II.2 donne en chiffre les erreurs commises sur l'éclairement, causées par l'utilisation de ces approximations.

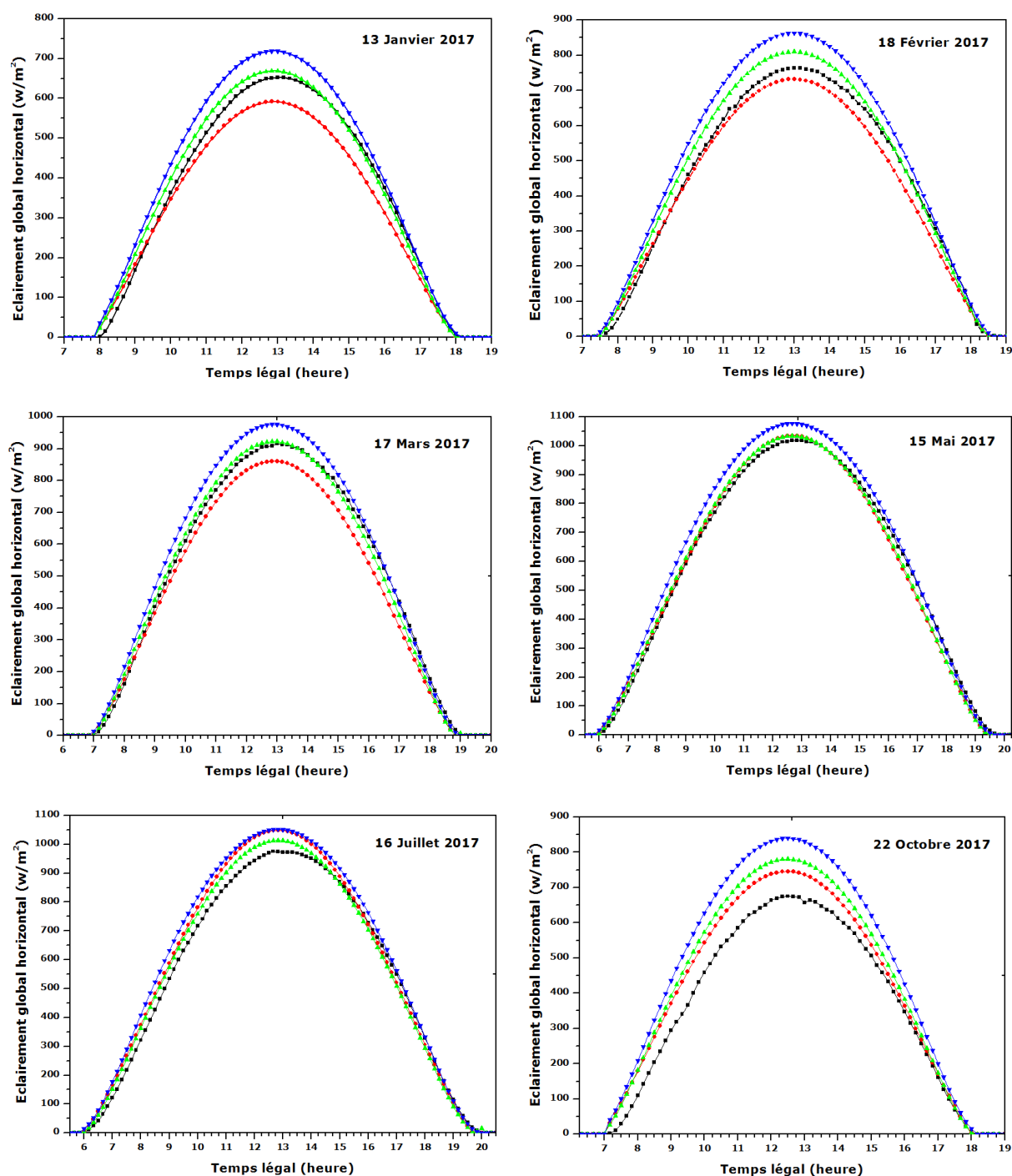


Figure II.2 : Comparaison entre les différents éclairagements globaux horizontaux : mesurés (en noir) et ceux calculés par les approches de Perrin (en rouge), Capderou (en vert), et R.sun (en bleu).

En statistique, on cherche souvent à établir une relation linéaire entre une variable et une ou plusieurs autres variables. Par définition, la corrélation mesure l'intensité de la liaison entre des variables, tandis que la régression analyse la relation d'une variable par rapport à une ou plusieurs autres. La régression est un ensemble de méthodes statistiques

très utilisées pour analyser la relation d'une variable par rapport à une ou plusieurs autres. Lorsqu'un diagramme de dispersion suggère que les variations d'une variable sont proportionnelles à celles de l'autre variable, l'analyse de régression linéaire permet de déterminer la droite approchant au mieux cette variation proportionnelle. Sur un graphique, cela revient à chercher la droite de laquelle tous les points sont aussi peu éloignés que possible de cette droite. Le but de la régression simple est d'expliquer une variable Y (I_{glob}) à l'aide d'une variable x ($I_{\text{mesuré}}$). Mathématiquement, les variables I_{glob} et $I_{\text{mesuré}}$ sont appelées respectivement variables dépendante et indépendante [13]. Dans la figure II.3, on se limite à tracer les modèles de régression linéaires qui s'accordent seulement avec les meilleures approches.

Tableau II.2 : Incertitudes et calculs d'erreurs commises sur les éclairagements globaux horizontaux (du lever au coucher du soleil).

		13 Janvier	18 Février	17 Mars	15 Mai	16 Juillet	22 Octobre
E_{r_m} (w/m^2)	Perrin	- 36.75	- 23.17	- 43.29	- 3.61	31.98	53.87
	Capderou	12.50	28.11	- 0.67	- 0.89	12.00	75.57
	R.sun	48.37	66.99	41.06	42.35	54.98	120.84
$E_{r_{rm}}$ (En %)	Perrin	32.62	16.27	14.85	12.04	15.57	63.72
	Capderou	29.19	17.12	11.49	10.86	12.04	60.95
	R.sun	43.52	38.27	21.29	18.41	23.83	95.92
$E_{r_{qm}}$ (w/m^2)	Perrin	48.32	33.61	52.66	26.99	49.29	61.10
	Capderou	24.72	37.25	24.74	25.81	34.38	84.83
	R.sun	55.15	75.34	51.44	52.49	66.09	131.39
$E_{r_{qm}}$ (En %)	Perrin	1.22	0.34	0.24	0.25	0.27	3.08
	Capderou	1.19	0.34	0.22	0.20	0.19	2.61
	R.sun	1.86	1.15	0.61	0.48	0.73	4.02
R^2	Perrin	0.98995	0.99313	0.99267	0.99408	0.99139	0.98854
	Capderou	0.99028	0.99382	0.99354	0.99473	0.99195	0.98853
	R.sun	0.99026	0.99387	0.99368	0.99477	0.99222	0.98809

En se référant à ces résultats, le modèle de Capderou présente une meilleure approche pour les journées du 13 Janvier, 17 Mars, 15 Mai et 16 Juillet. Par contre, l'approximation de Perrin est la plus avantageuse par rapport aux autres modèles d'estimation. Par ailleurs, le coefficient de

régression linéaire R^2 traduit une excellente linéarité pour tous les cas, il se rapproche fortement vers 99%.

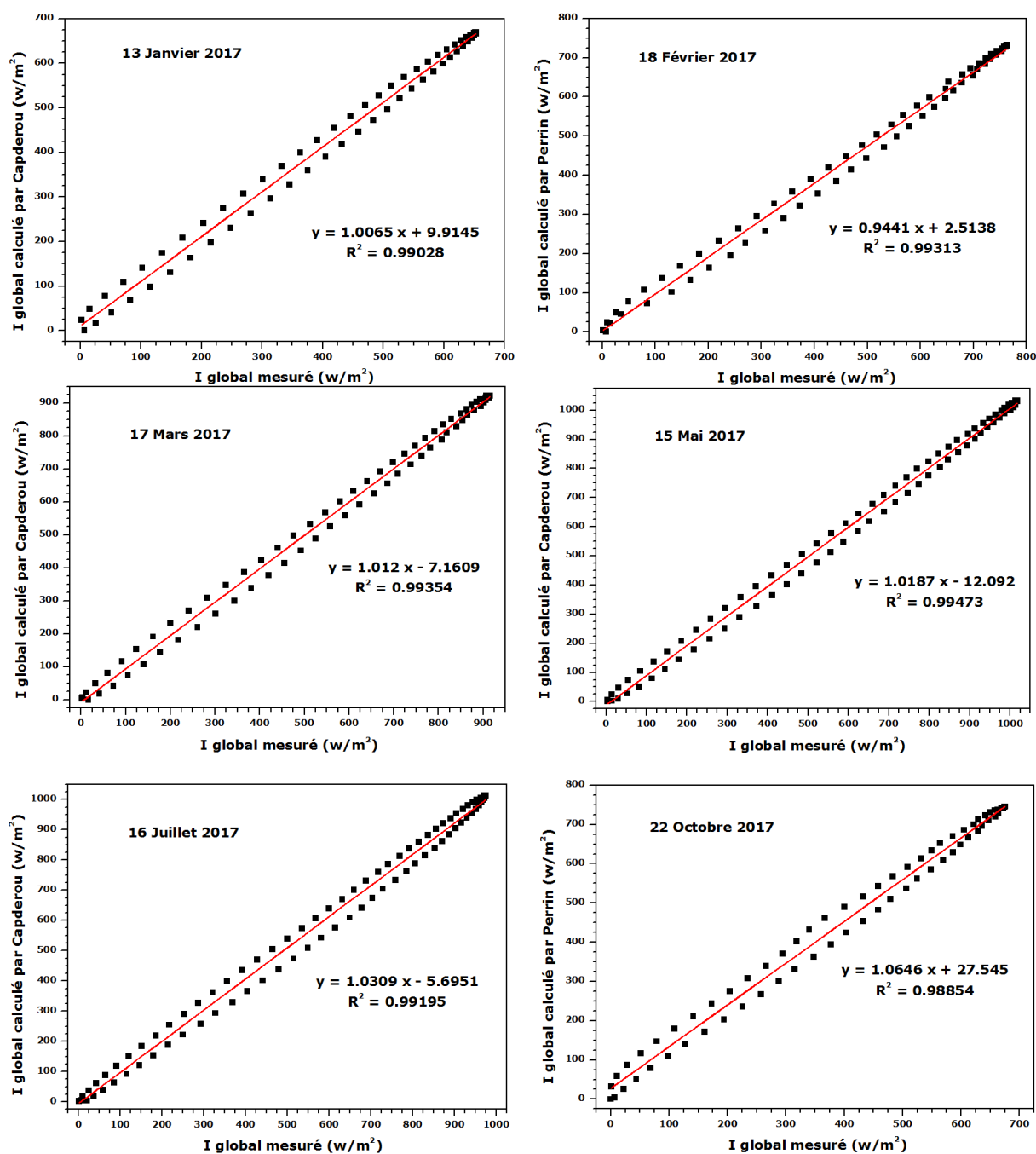


Figure II.3 : Diagramme de dispersion avec droite de régression, l'éclairement solaire global horizontal correspondant à la meilleure approche.

La figure II.4 représente les différentes courbes de l'éclairement global incliné à 32° sud conformément aux trois approches. La comparaison s'est effectuée en temps réel avec les valeurs collectées de la station

radiométrique. Le tableau II.3 récapitule en chiffre les erreurs quantifiées relatives à chaque approximation.

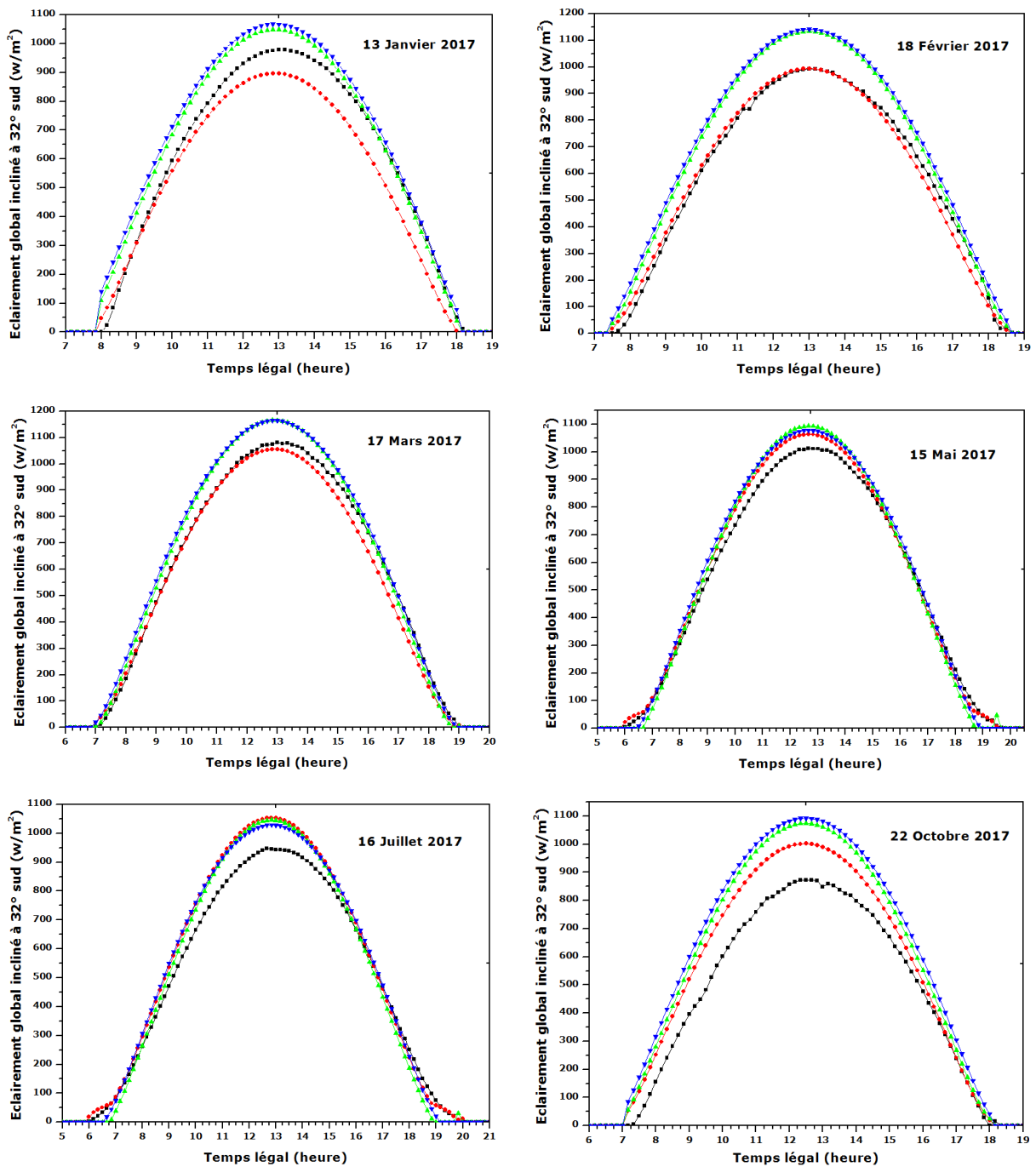


Figure II.4 : Comparaison entre les différents éclairagements inclinés à 32° sud : mesurés (en noir) et ceux calculés par les approches de Perrin (en rouge), Capderou (en vert), et R.sun (en bleu).

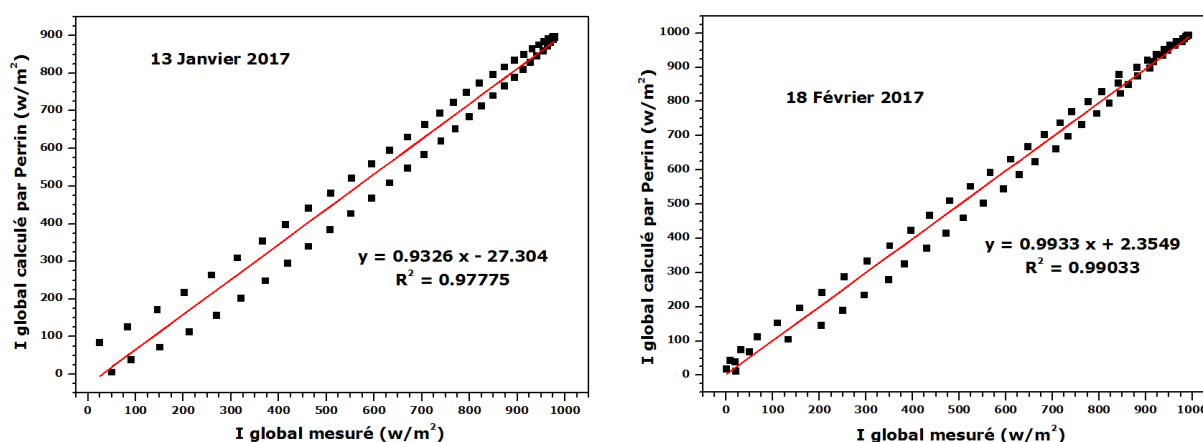
Les résultats obtenus pour les éclairagements globaux inclinés à 32° sud prouvent que, dans l'ensemble, le modèle de Perrin favorise une estimation plus précise. En effet, on observe toujours une faible dispersion

des points. Le coefficient de régression linéaire et le nuage de points observé ont montré une bonne linéarité des valeurs, le coefficient R^2 est toujours supérieur à 97%.

Tableau II.3 : Incertitudes et calculs d'erreurs commises sur les éclairagements globaux inclinés à 32° sud (du lever au coucher du soleil).

		13 Janvier	18 Février	17 Mars	15 Mai	16 Juillet	22 Octobre
E_{r_m} (w/m^2)	Perrin	- 70.78	- 1.74	- 27.59	21.87	52.00	93.81
	Capderou	53.05	99.03	40.16	25.91	29.15	142.82
	R.sun	79.98	120.19	57.74	41.78	49.03	173.05
E_{r_m} (En %)	Perrin	19.91	51.16	22.72	6.66	10.47	48.26
	Capderou	22.51	105.00	14.85	12.18	14.12	61.84
	R.sun	29.80	157.12	28.63	9.58	11.19	84.76
$E_{r_{qm}}$ (w/m^2)	Perrin	84.22	31.83	42.28	37.30	71.57	106.55
	Capderou	70.00	109.78	61.31	55.40	66.28	157.25
	R.sun	91.48	127.41	70.00	54.88	65.69	184.02
$E_{r_{qm}}$ (En %)	Perrin	0.39	2.82	0.87	0.08	0.12	2.00
	Capderou	0.75	5.74	0.23	0.21	0.22	2.28
	R.sun	0.95	8.74	0.97	0.13	0.14	3.13
R^2	Perrin	0.97775	0.99033	0.99188	0.99568	0.99227	0.98333
	Capderou	0.97768	0.99102	0.99259	0.99575	0.99227	0.98326
	R.sun	0.97768	0.99100	0.99271	0.99511	0.99183	0.98260

Ainsi, l'avantage des modèles de régression est que l'on peut par la suite mesurer l'importance de l'association entre les deux variables I_{glob} et $I_{mesuré}$. Pour cette raison, nous présentons les graphiques des modèles de régression linéaire obtenus dans la figure II.5.



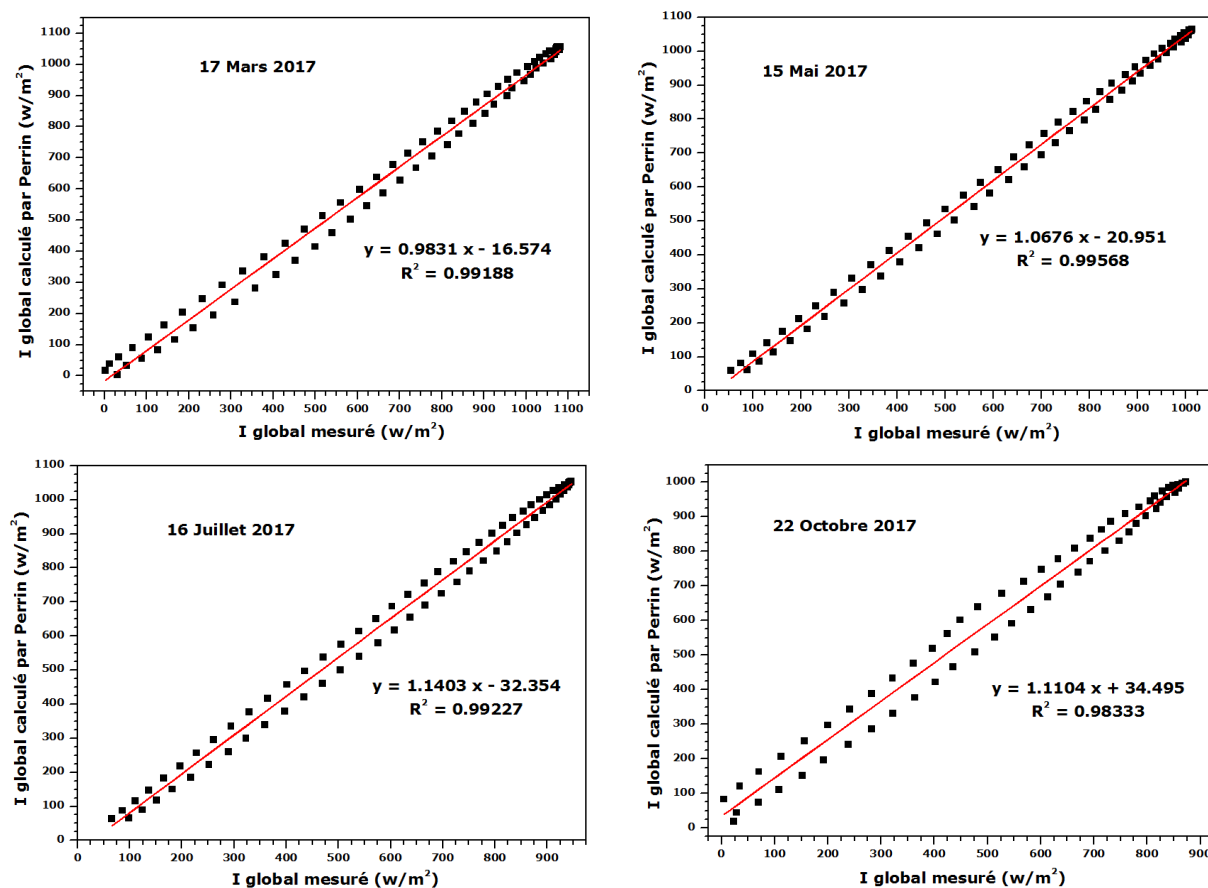


Figure II.5 : Diagramme de dispersion avec droite de régression, l'éclairement solaire global incliné à 32° sud : approche de Perrin.

II.6. Apports solaires

Des exigences plus strictes en matière de réglementation des bâtiments ont attiré l'attention sur la prévention de la surchauffe des bâtiments. Cela nécessite principalement une réduction du gain solaire provenant du rayonnement solaire entrant. La solution n'est pas facile, elle ne consiste pas à utiliser simplement de petites surfaces de vitrage, car il y a un besoin de lumière du jour, de vues. Dans cette situation, notre démarche se dirige vers le choix optimal de l'orientation de l'édifice qui peut favoriser une minimisation du gain solaire en été et son élévation en hiver [14].

II.6.1. Méthode de calcul

Les apports solaires dépendent de l'ensoleillement présent sur le site et des surfaces réceptrices. Pour une période de calcul donnée, les apports solaires se calculent comme suit [15-17]:

$$Q_{\text{Solaire}} = \sum_j I_j \sum_n A_{nj} \quad (\text{II.73})$$

La première somme s'effectue sur toutes les orientations j , (Horizontal, Nord, Sud, Est, Ouest, Nord-Est, Nord-Ouest, Sud-Est, Sud-Ouest ...etc.). La seconde s'effectue sur toutes les surfaces n d'orientations j qui captent le rayonnement solaire.

I_j : l'irradiation solaire sur une surface unitaire ayant l'orientation j , elle s'exprime en Wh/m^2 .

A_{nj} : l'aire réceptrice équivalente de la surface (m^2) ayant l'orientation j . Elle est calculée comme suit [15-17]:

$$A_n = A F_{\text{Omb}} F_{\text{Red}} g \quad (\text{II.74})$$

A : l'aire de la baie (m^2)

F_{Omb} : le facteur de correction de l'ombrage. Il est par définition le rapport entre le gain solaire dû à l'éclairement direct du soleil à travers une paroi de verre donnée, sur le gain solaire passant à travers un vitrage clair. Il est donc compris entre 0 et 1. Il sert d'indicateur de la capacité du vitrage à isoler l'intérieur du rayonnement direct extérieur. Il est en fonction de la hauteur du masque. Les valeurs proposées de ce facteur sont données dans le tableau II.4.

Tableau II.4 : Facteurs d'ombrage pour les différentes orientations.

L'orientation de l'ouverture	Sud	Sud-Est	Est	Nord-Est	Nord	Nord-Ouest	Ouest	Sud-ouest
La Valeur de F_{Omb}	0.72	0.69	0.67	0.78	0.89	0.78	0.67	0.69

F_{Red} : le facteur de réduction pour les encadrements des vitrages, égale au rapport de l'aire de la surface transparente à l'aire totale de la menuiserie vitrée. La valeur retenue dans notre cas est de 0.8.

g : est le facteur solaire de la baie vitrée. Le facteur solaire est la quantité totale d'énergie que laisse passer un vitrage par rapport à l'énergie solaire incidente. Le facteur solaire utilisé dans cette formule est en principe la moyenne dans le temps du rapport de l'énergie traversant l'élément

exposé à l'énergie incidente sur celui-ci, en l'absence d'ombrage. Certaines valeurs figurent dans le tableau II.5.

Tableau II.5 : Facteurs solaires pour les types de vitrages les plus courants.

Type du vitrage	Simple vitrage	Double vitrage clair	Simple vitrage à incidence normale	Double vitrage clair à incidence normale
g	0.8	0.7	0.85	0.75

II.6.2. Calcul des irradiations solaires mensuelles moyennes

L'utilisation des approches mathématiques s'est donc immédiatement imposée que se soit pour la réalisation des programmes et codes ou pour la modélisation d'une telle grandeur ou d'un tel dispositif.

Les travaux menés par Yaïche et al [18] ont permis de développer un outil de simulation sous Excel permettant de calculer les irradiations solaires pour une journée quelconque. L'irradiation solaire journalière est par définition l'intégrale de l'éclairement solaire du lever au coucher du soleil. Le model de Perrin a été partiellement introduit pour l'estimation des irradiations solaires instantanées et journalières.

Les valeurs retenues de l'irradiation journalière moyenne mensuelle relative à la wilaya de Ghardaïa sont données dans le tableau II.6.

Tableau II.6 : Irradiations solaires mensuelles (journalières moyennes) incidentes sur un capteur vertical, exprimées en Wh/m², cas d'un ciel totalement clair.

	Est	Sud	Ouest	Nord	Sud-ouest Sud-est	Nord-ouest Nord-est
Janvier	2655	6775	2655	260	5218	548
Février	3268	6580	3268	308	5374	956
Mars	3761	5512	3761	382	5048	1619
Avril	4212	3941	4212	700	4478	2511
Mai	4253	2697	4257	1433	3780	3096
Juin	4237	2156	4239	2086	3429	3413
Juillet	4099	2340	4109	1754	3476	3178
Août	3943	3201	3943	970	3891	2609
Septembre	3615	4454	3615	529	4402	1869
Octobre	3153	5641	3153	403	4785	1150
Novembre	2690	6316	2690	312	4950	670
Décembre	2324	6477	2324	258	4909	422

II.6.3. Influence de l'orientation des baies vitrées

L'orientation optimale d'une structure est un compromis entre sa fonction, son emplacement, et les facteurs environnementaux en vigueur de la chaleur, la lumière, l'humidité et le vent. L'influence de l'orientation sur les gains solaires gratuits doit être étudiée aussi en fonction de certains paramètres géométriques liés à la construction. Les apports déduits représentent l'énergie solaire introduite par l'ensoleillement direct via les vitrages et par transmission surfacique des parois en contact avec l'extérieur. L'énergie captée se manifeste sous forme de chaleur et sans disposition spéciale de captage.

Le cas de notre étude, est une maison familiale multizone décrite sur la figure II.6. Ce logement comporte 2 chambres, un séjour, une cuisine, une toilette, une salle de bain, un hall et trois couloirs. Le système constructif de l'habitat est un système poteaux poutres. Deux variétés des murs pour cette maison existent, les murs extérieurs d'épaisseurs de 25 cm et qui se composent de matériaux de construction locaux (brique creuse en position horizontal, ciment mortier, enduit, ...etc.). Les murs intérieurs et les cloisons sont d'une épaisseur de 15 cm, ils sont en général en briques creuse en position vertical, ciment mortier, enduit,...etc. La maison a une surface habitable d'environ 107 m², la hauteur des murs égale à 3 m.

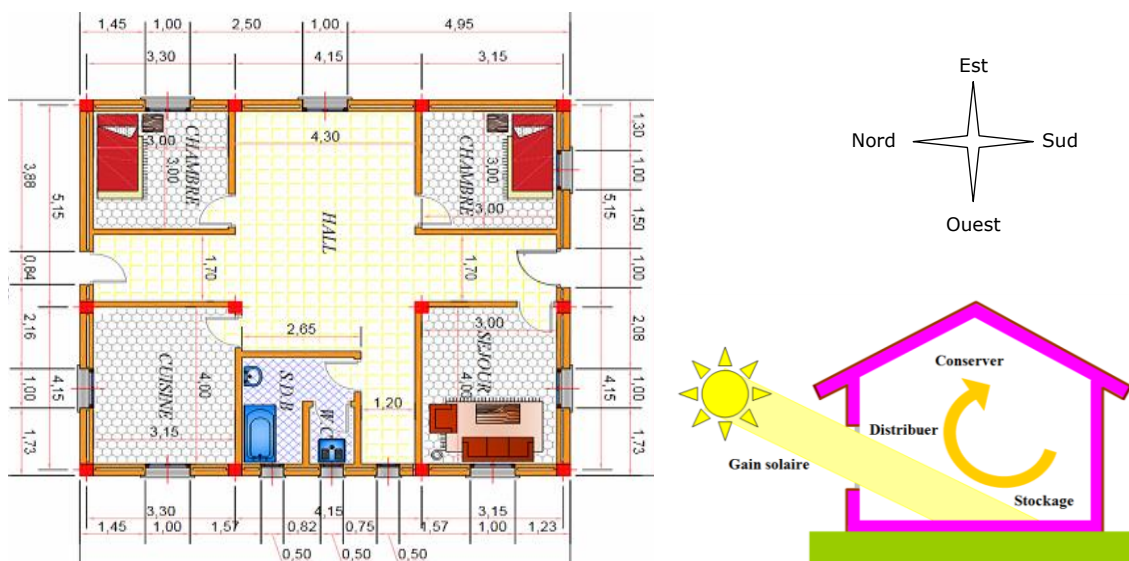


Figure II.6 : Plan descriptif 2D et concept de chauffage passif.

Les fenêtres et les portes vitrées contribuent donc de manière significative à l'équilibre énergétique. Leurs contributions dépendent de plusieurs paramètres, par exemple le climat, l'orientation et le type de paroi. Les dimensions des baies vitrées doivent avoir une forte intention pour la réalisation de cette étude (figure II.7).

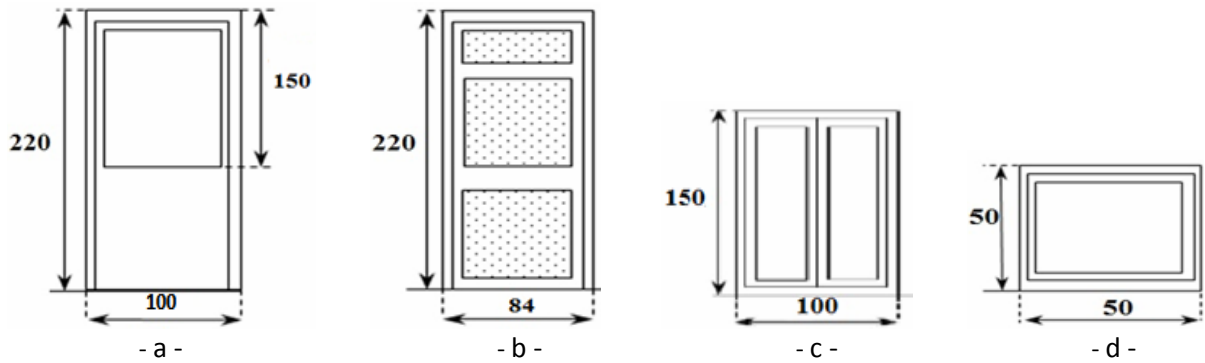


Figure II.7 : Dimensions des ouvertures, en cm: (a) Porte fenêtre P1, (b) Porte opaque d'entrée P2, (c) Fenêtre type 1, (d) Fenêtre type 2.

Nous supposons que la porte côté Sud est vitrée à 68%.

Les surfaces des ouvertures :

Coté Sud : $A = 4.5 \text{ m}^2$. Coté nord : $A = 1.5 \text{ m}^2$. Coté Est : $A = 3 \text{ m}^2$. Coté Ouest : $A = 3.75 \text{ m}^2$.

On détermine donc A_{nj} en effectuant les multiplications suivantes:

$$A_{n_Sud} = 4.5 \times 0.64 \times 0.72 = 1.4256 \text{ m}^2$$

$$A_{n_Nord} = 1.5 \times 0.64 \times 0.89 = 0.5874 \text{ m}^2$$

$$A_{n_Est} = 3 \times 0.64 \times 0.67 = 0.8844 \text{ m}^2$$

$$A_{n_Ouest} = 3.75 \times 0.64 \times 0.67 = 1.1055 \text{ m}^2$$

En prenant l'exemple de l'orientation Sud, l'équation II.73 se transforme sous cette forme:

$$Q_{\text{Solaire}} = I_{\text{Sud}} A_{n_Sud} + I_{\text{Nord}} A_{n_Nord} + I_{\text{Est}} A_{n_Est} + I_{\text{Ouest}} A_{n_Ouest} \quad (\text{II.75})$$

La figure II.8 donne les valeurs du gain solaire mensuel (journalier moyen) en fonction du mois en question. En faisant tourner les façades vers l'une des directions Est ou Ouest par 45° ; c'est-à-dire, en variant l'azimut du plan vertical de captation δ_{plan} par 45° , nous obtenons les orientations suivantes: Sud " $\delta_{\text{plan}} = 0^\circ$ ", Sud-ouest " $\delta_{\text{plan}} = 45^\circ$ ", Ouest " $\delta_{\text{plan}} = 90^\circ$ ", Nord-ouest

" $\delta_{\text{plan}} = 135^\circ$ ", Nord " $\delta_{\text{plan}} = 180^\circ$ ", Nord-est " $\delta_{\text{plan}} = -135^\circ$ ", Est
 " $\delta_{\text{plan}} = -90^\circ$ ", Sud-est " $\delta_{\text{plan}} = -45^\circ$ ".

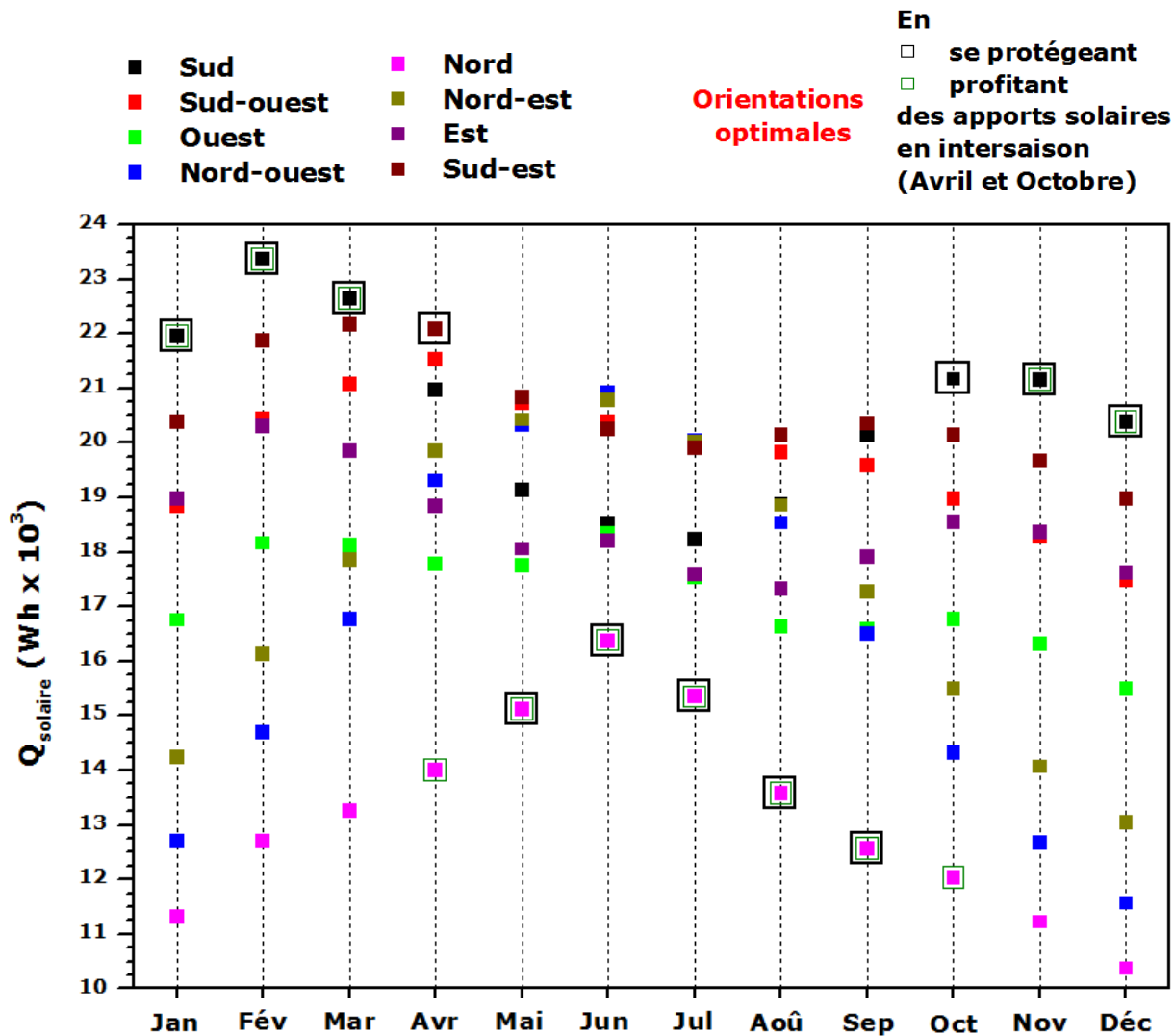


Figure II.8 : Variation du gain solaire mensuel (journalier moyen).

La figure II.8 a montré que, pour profiter des apports solaires gratuits, il est recommandé de retenir l'orientation Sud du mois de Novembre au mois de Mars. Pour un meilleur confort, il est donc demandé aux occupants de séjourner à la salle du séjour et à la chambre Sud au cours de cette période si la position de l'édifice correspond à la figure II.6. D'autre part, l'orientation Nord est la plus favorable si nous voulons se protéger des surchauffes. La même chose, si la position de l'édifice correspond à la figure II.6, il est donc prioritaire aux occupants de s'installer aux autres chambres coté Nord. En intersaison, prendre une

décision exhaustive est quasiment compliqué, le choix retenu sera en fonction des besoins énergétiques du mois en question, Avril ou Octobre. Il se peut que même, au cours de la même journée, on change de comportement. Les conditions climatiques environnantes exigent parfois à l'occupant de profiter et se protéger de l'ensoleillement à l'horizon de quelques heures, si ce n'est moins. Durant cette phase dite "de transition", l'orientation Sud est le meilleur choix si nous voulons profiter de l'ensoleillement. Par opposition, l'orientation Nord reste toujours la plus convenable en vue de se protéger contre les surchauffes.

Le choix de l'orientation d'un bâtiment dépend à la fois de la forme et de la situation géographique (la latitude). L'effet de la forme du bâtiment sur son comportement thermique est en fonction du degré d'exposition de l'enveloppe à l'ensoleillement, à la température extérieure et au vent. Chaque cas donc est différent, mérite que l'on se penche sur sa structure. Notre méthode permet d'optimiser l'orientation de cet habitat. Il s'est trouvé qu'une orientation Sud-est ou Sud-ouest peut être potentiellement soumise à une surchauffe durant l'été. Tandis que l'orientation Nord peut être soumise à un gain de chaleur réduit pendant l'hiver, ce qui exige inévitablement une charge de chauffage plus élevée.

II.7. Conclusion

Une étude sur les performances de trois modèles d'estimation du rayonnement solaire par ciel clair a été menée.

Les modèles empiriques appliquées au site de Ghardaïa ont été comparés aux données réelles. Il s'est avéré que le modèle de Capderou présente une meilleure approche pour les journées du 13 Janvier, 17 Mars, 15 Mai et 16 Juillet pour une surface horizontale. Par contre, l'approximation de Perrin est la plus favorable par rapport aux autres modèles d'estimation au profit des autres journées [19].

Contrairement à l'éclairement incident sur un plan horizontal, les résultats des éclairagements globaux inclinés à 32° sud prouvent que, dans l'ensemble, le modèle de Perrin favorise une estimation plus précise. Par

ailleurs, on observe toujours une faible dispersion des points. Le coefficient de régression linéaire et le nuage de points observé ont montré une bonne linéarité des valeurs, le coefficient R^2 est toujours supérieur à 97%.

En second partie, l'implantation judicieuse d'un habitat est la tâche la plus importante dans un tel projet. Elle doit y reposer sur une connaissance très fine sur le vent d'hiver, les caractéristiques topographiques et climatiques du site.

Les grandes fenêtres peuvent engendrer des sérieux problèmes; en été, les parois transparentes deviennent une source principale des gains de chaleur si elles ne sont pas correctement ombragées, alors que, en hiver, une quantité conséquente de la chaleur interne s'échappe à l'extérieur par ces baies si le verre n'est pas traité correctement. L'orientation d'un espace à vivre est déterminée principalement par ses ouvrants. Les solutions proposées doivent concilier la recherche de soleil l'hiver, et la minoration des apports solaires l'été.

L'orientation Sud c'est le côté le plus précieux de la maison, favorisant ainsi un bon ensoleillement l'hiver et permettant encore une intégration judicieuse des différentes méthodes de conception bioclimatique. Une bonne orientation et un meilleur positionnement d'un bâtiment par rapport aux variations saisonnières peuvent augmenter l'efficacité énergétique. Les espaces à faibles besoins de chauffage et lumineux (entrées, circulations, sanitaires...) et ceux non chauffés seront disposés de préférence au Nord. Les chambres seront utilement ouvertes au Sud, afin de bénéficier d'un bon ensoleillement l'hiver [20].

Le choix de l'orientation est soumis à de nombreuses considérations, son optimisation exige un savoir acquis sur au moins :

- A tout instant, la position du soleil
- Les apports solaires entrants
- L'aménagement des parties extérieures voisines (stratégies d'ombrage)
- L'éclairage naturel des espaces intérieures,

- L'emplacement et positionnement des fenêtres et des protections solaires.

Références

1. F. Yettou, A. Malek, M. Haddadi, A. Gama, Etude comparative de deux modèles de calcul du rayonnement solaire par ciel clair en Algérie, *Revue des Energies Renouvelables*, vol 12 (2), 331 – 346, 2009.
2. K. Bouchouicha, Modélisation multi-spectrale des images satellitaires, Application : Quantification du bilan d'énergie sol-atmosphère, Thèse de Doctorat en Sciences Physiques, Option : Rayonnement et Matière, Université des sciences et technologie d'Oran, 2017.
3. G. Boulet, Modélisation des changements d'échelle et prise en compte des hétérogénéités de surface et de leur variabilité spatiale dans les interactions sol-végétation-atmosphère, Thèse de Doctorat en Géophysique, Géochimie, Géomécanique, Université Joseph Fourier Grenoble I, Laboratoire d'étude des transferts en hydrologie et environnement, LTHE, CNRS UMR 5564, UJF INPG IRD, 1999.
4. Y. El Mghouchi, A. El Bouardi, Z. Choulli, T. Ajzoul, Models for obtaining the daily direct, diffuse and global solar radiations, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol 56, 87 – 99, 2016.
5. A. Moumami, N. Hamani, N. Moumami, Z. Mokhtari, Estimation du rayonnement solaire par deux approches semi empiriques dans le site de Biskra, SIPE8, 8^{ème} Séminaire International sur la Physique Energétique, Algérie, Novembre 2006.
6. Z. Qu, La nouvelle méthode Heliosat-4 pour l'évaluation du rayonnement solaire au sol, Doctorat ParisTech, Spécialité Energétique et Procédés, École nationale supérieure des mines de Paris, 2013.
7. R. Maouedj, Application de l'énergie photovoltaïque au pompage hydraulique sur les sites de Tlemcen et de Bouzareah, Mémoire de Magister en Physique Energétique et Matériaux, Université Abou Bekr-Belkaïd, Tlemcen, Décembre 2005.
8. S.M.A. Bekkouche, Modélisation du comportement de quelques dispositifs solaires, Thèse de Doctorat en Physique, Université Abou Bekr- Belkaïd, Tlemcen, Juin 2009.
9. K. Gairaa, S. Benkacali, Analysis of solar radiation measurements at Ghardaïa area, south Algeria, *Energy Procedia*, vol 6, 122 – 129, 2011.
10. F. Linke, Transmissions - Koeffizient und Trübungsfaktor, *Beiträge zur Physik der Atmosphäre*, Vol 10, 91 – 103, 1922.

11. M. Hamdani, Etude et effet de l'orientation de deux pièces d'un habitat en pierre situé à Ghardaïa, Thèse de Magister en Energies Renouvelables, Université Abou Bekr- Belkaïd, Tlemcen, 2011.
12. M. Capderou, Atlas solaire de l'Algérie', Modèles théoriques et expérimentaux, Vol 1, T1, Office des publications universitaires, EPAU, Algérie, 375, 1987.
13. Concepts et outils en EBM, La différence entre régression et corrélation, Minerva, volume 15 n° 2, Mars 2016, www.minerva-ebm.be. Consulté en Mai 2020.
14. Y. Wang, Y. Chen, Modeling and calculation of solar gains through multi-glazing facades with specular reflection of venetian blind, Solar Energy, vol 130, 33 – 45, 2016.
15. S.M.A. Bekkouche, T. Benouaz, M.R. Yaiche, M.K. Cherier, M. Hamdani, F. Chellali, Introduction to control of solar gain and internal temperatures by thermal insulation, proper orientation and eaves, Elsevier, Energy and Buildings, vol 43, 2414 – 2421, 2011.
16. M.A.C. Haddam, Application de quelques notions de la conception bioclimatique pour l'amélioration de la température interne d'un habitat, Thèse de Doctorat en Sciences Physiques, Option : Physique Electronique et Modélisation, Université Abou Bekr- Belkaïd, Tlemcen, 2015.
17. S. Belgherras, S.M.A. Bekkouche, T. Benouaz, N. Benamrane, Prospective analysis of the energy efficiency in a farm studio under Saharan weather conditions, Energy and Buildings, vol 45, 342 – 353, 2017.
18. M.R. Yaïche, S.M.A. Bekkouche, Conception et validation d'un logiciel sous Excel pour la modélisation d'une station radiométrique en Algérie cas d'un ciel totalement clair, Revue des Energies Renouvelables 2009, vol 12 (4), 677 – 688, 2009.
19. A. Bensaha, F. Benkouider, S.M.A. Bekkouche, Estimation du rayonnement solaire en ciel clair par des modèles empiriques: Application au site de Ghardaïa (Algérie), 1st International Seminar on the Apport of the Simulation in Technological Innovation, Ghardaïa (Algeria), Mars, 7-8, 2017.
20. A. Bensaha, S.M.A. Bekkouche, F. Benkouider, M.R. Yaiche, N. Benamrane, A. Abdellaoui, Concepts du solaire passif : Orientation des bais vitrées et gains solaires, Revue des Sciences et Sciences de l'Ingénieur (RSSI), Vol. 07, No. 01, 01-07, July 2018.

Chapitre III

Les Concepts Passifs et Actifs

à l'Egard de l'Efficacité

Energétique

Chapitre III :

Les Concepts Passifs et Actifs à l'Egard de l'Efficacité Energétique

III.1. Introduction

La forte demande actuelle de consommation énergétique en Algérie est due principalement à l'augmentation du niveau de vie de la population et du confort qui en découle, ainsi qu'à la croissance des activités industrielles. Elle nous interpelle sur la nécessité d'une nouvelle politique énergétique ainsi que de nouveaux comportements des usagers. L'augmentation du prix de l'énergie a suscité l'intérêt d'utiliser des sources d'énergie gratuites et inépuisables comme celles provenant du rayonnement solaire.

En Algérie, le secteur du bâtiment est le secteur le plus énergivore. Sa consommation représente plus de 42% de la consommation finale. Les raisons qui ont conduit à l'augmentation de la consommation d'énergie dans le secteur résidentiel sont l'augmentation substantielle de la population, du nombre de logements, des prix bas de l'énergie conventionnelle, de l'augmentation du nombre d'équipements électriques dans chaque foyer, de l'utilisation des équipements électriques non-économiques tels que les lampes à incandescence et de l'absence de la sensibilisation sur la maîtrise et l'efficacité énergétique [1].

L'amélioration de l'efficacité énergétique dans les bâtiments résidentiels et tertiaires contribuera à réduire l'intensité énergétique. La régulation thermique est un ensemble de lois qui visent à contrôler l'énergie dans le bâtiment, à assurer le confort des passagers, à réduire les émissions de polluants locaux et globaux et à réduire les coûts d'exploitation des bâtiments (chauffage et climatisation).

Les bâtiments jouent un rôle de filtre thermique qui permet de réintégrer son propre microclimat interne indépendant du climat extérieur. De nombreux paramètres affectent les caractéristiques, qui comprennent la forme du bâtiment [2-6], son orientation [7-10] et les éléments du

bâtiment. L'ambiance interne ne répond pas toujours aux exigences de confort de l'utilisateur. Ceci conduit à l'utilisation des moyens de correction pour améliorer le confort [1].

Le confort thermique peut se définir comme étant la satisfaction exprimée par un individu à l'égard de l'ambiance thermique du milieu dans lequel il évolue. Ainsi, pour être en situation de confort thermique, une personne ne doit avoir ni trop chaud, ni trop froid et ne ressentir aucun courant d'air gênant. Le confort thermique correspond à un état d'équilibre thermique et hydrique entre le corps humain et son environnement. Il dépend de l'activité physique du métabolisme, de l'habillement et de la sensibilité (aspect psycho-sociologue) de chaque individu, de la température de l'environnement (air, parois) et des mouvements d'air et de l'humidité [11].

L'objectif principal de ce chapitre est de montrer que le choix d'une démarche de conception bioclimatique favorise des économies d'énergies importantes et permet de réduire les charges de chauffage et de climatisation. Le choix s'est porté toujours sur le même plan proposé dans le chapitre 2 pour entreprendre et réaliser ces travaux.

III.2. Méthode d'évaluation de l'efficacité énergétique

La consommation conventionnelle d'énergie primaire se base sur le chauffage, le refroidissement, la ventilation, les auxiliaires, la production d'eau chaude sanitaire et l'éclairage des locaux. L'efficacité énergétique d'un bâtiment est définie par son équilibre thermique, équilibrer les gains et les pertes contribue à maintenir un confort agréable. Les besoins en chauffage et/ou en refroidissement calculés pour un bâtiment, exprimés en kilowattheures (kWh) sont donnés comme suit [12-17]:

- En période de chauffage

$$Q_{\text{Tot}} = Q_{\text{Enveloppe}} - (Q_{\text{Occup}} + Q_{\text{Elec}}) + Q_{\text{ECS}} + Q_{\text{Cons_Elc}} - Q_{\text{Solaire}} \quad (\text{III.1})$$

- En cas de surchauffe (période de refroidissement)

$$Q_{Tot} = Q_{Enveloppe} + (Q_{Occup} + Q_{Elec}) + Q_{ECS} + Q_{Cons_Elc} + Q_{Solaire} \quad (III.2)$$

- En intersaisons

$$Q_{Tot} = \left| Q_{Enveloppe} - (Q_{Occup} + Q_{Elec}) \right| + Q_{ECS} + Q_{Cons_Elc} \pm Q_{Solaire} \quad (III.3)$$

III.2.1. Besoins énergétiques dus à l'enveloppe

Les besoins énergétiques calculés pour un bâtiment par degré de différence en température entre l'intérieur et l'extérieur sont exprimés en kilowatts-heure par la formule suivante [15-17]:

$$Q_{Enveloppe} = 24 DP_{Enveloppe} Dj \quad (III.4)$$

$DP_{Enveloppe}$: Somme des déperditions thermiques dues aux murs, fenêtres, portes, plafonds, ponts thermiques, sol, planchers et à la ventilation, en W/K.

Dj : Nombre de degrés-jours de chauffage ou de refroidissement.

$$Q_{Enveloppe} = DP_{plafonds} + DP_{murs} + DP_{sols} + DP_{portes} + DP_{fenêtres} + DP_{ponts} + DP_{ventil} \quad (III.5)$$

Le calcul de chaque terme est issu des équations suivantes:

$$DP_{plafonds} = \sum_{i=1}^{i=n} b_{plafond_i} S_{plafond_i} U_{plafond_i} \quad (III.6)$$

$$DP_{murs} = \sum_{i=1}^{i=n} b_{mur_i} S_{mur_i} U_{mur_i} \quad (III.7)$$

$$DP_{sols} = \sum_{i=1}^{i=n} b_{sol_i} S_{sol_i} U_{sol_i} \quad (III.8)$$

$$DP_{portes} = \sum_{i=1}^{i=n} b_{porte_i} S_{porte_i} U_{porte_i} \quad (III.9)$$

$$DP_{fenêtres} = \sum_{i=1}^{i=n} b_{fenêtre_i} S_{fenêtre_i} U_{fenêtre_i} \quad (III.10)$$

S_i : la surface, par m^2 .

b_i : le coefficient de réduction des déperditions thermiques.

Le calcul de ce coefficient se base sur :

- La surface des parois séparant l'espace non chauffé des espaces chauffés : S_{Inc-Ic} (m^2).
- La surface des parois séparant le local non chauffé de l'extérieur, du sol ou d'un autre local non chauffé : S_{Inc-Ex} (m^2).
- Le type du local non chauffé (garage, comble, circulation, ...).
- L'état d'isolation des parois donnant sur le local non chauffé (isolées, non isolées).
- L'état d'isolation des parois du local non chauffé (isolées, non isolées).

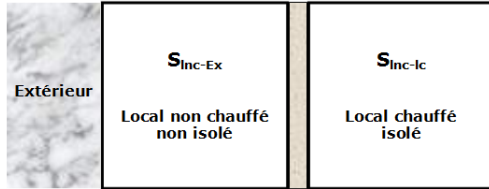
Pour une paroi donnant sur l'extérieur, $b=1$. Pour une paroi enterrée ou un plancher sur vide sanitaire, $b=0,8$. Pour les bâtiments adjacents autres que d'habitation, $b=0,2$. Dans les autres cas, la méthode de calcul qui suit doit être utilisée. Des valeurs du coefficient b sont données dans les tableaux suivants en fonction du rapport des surfaces S_{Inc-Ic} / S_{Inc-Ex} et du coefficient surfacique équivalent U ($W/m^2 K$) qui mesure la transmission thermique. Les parois en double vitrage et les portes seront considérées comme non isolées pour le calcul de b . Les parois en triple vitrage seront considérées comme isolées.

U_i : le coefficient de transmission thermique par degré de différence entre l'intérieur et l'extérieur, en $W/m^2 K$.

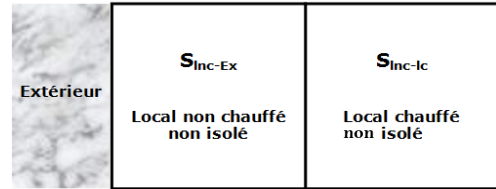
La résistance thermique totale d'une paroi est la somme des résistances thermiques de chacune de ses couches, à savoir : la résistance de chacune des couches et la résistance thermique d'échange superficiel. À la surface intérieure et extérieure de la paroi, deux résistances supplémentaires sont dues à une mince couche d'air quasi immobile dans lesquelles la transmission de chaleur se fait par convection et par rayonnement. La résistance thermique R mesure l'aptitude d'un matériau à résister au passage d'un flux de chaleur. Ainsi, les valeurs des coefficients de transmission thermique U seront calculées comme suit conformément au tableau III.1:

$$U_i = \frac{1}{R_{si} + \sum_{i=1}^{i=n} R_i + R_{se}} \quad (\text{III.11})$$

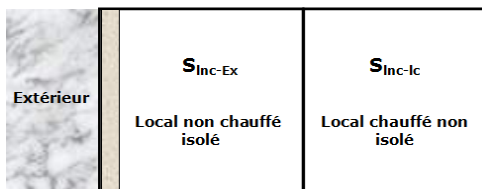
Tableau III.1 : Coefficient de réduction des déperditions bi pour une paroi i (vitrée ou/et opaque) en fonction du rapport des surfaces S_{Inc-lc} / S_{Inc-Ex} et du coefficient surfacique équivalent U [15-17].



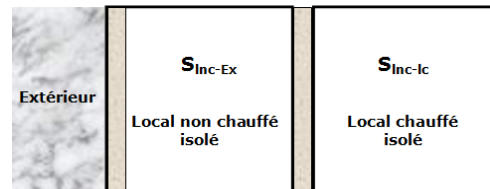
S_{Inc-lc} / S_{Inc-Ex}	$U_{V,ue} (W/m^2 K)$			
	0.0	0.3	3.0	9.0
≤ 0.25	0.95	0.95	1.00	1.00
$0.25 < \leq 0.50$	0.95	0.95	0.95	1.00
$0.50 < \leq 0.75$	0.90	0.95	0.95	1.00
$0.75 < \leq 1.00$	0.85	0.90	0.95	0.95
$1.00 < \leq 1.25$	0.85	0.90	0.90	0.95
$1.25 < \leq 2.00$	0.80	0.80	0.90	0.95
$2.00 < \leq 2.50$	0.75	0.80	0.85	0.90
$2.50 < \leq 3.00$	0.70	0.75	0.85	0.90
$3.00 < \leq 3.50$	0.65	0.75	0.80	0.90
$3.50 < \leq 4.00$	0.65	0.70	0.80	0.90
$4.00 < \leq 6.00$	0.55	0.60	0.70	0.85
$6.00 < \leq 8.00$	0.45	0.55	0.65	0.80
$8.00 < \leq 10.0$	0.40	0.50	0.60	0.75
$10.0 < \leq 25.0$	0.35	0.40	0.50	0.70
$25.0 < \leq 50.0$	0.20	0.25	0.35	0.50
$50.0 <$	0.10	0.15	0.20	0.30



S_{Inc-lc} / S_{Inc-Ex}	$U_{V,ue} (W/m^2 K)$			
	0.0	0.3	3.0	9.0
≤ 0.25	0.8	0.85	0.90	0.95
$0.25 < \leq 0.50$	0.65	0.75	0.80	0.90
$0.50 < \leq 0.75$	0.55	0.65	0.75	0.85
$0.75 < \leq 1.00$	0.50	0.55	0.70	0.80
$1.00 < \leq 1.25$	0.45	0.50	0.65	0.80
$1.25 < \leq 2.00$	0.35	0.40	0.50	0.70
$2.00 < \leq 2.50$	0.30	0.35	0.45	0.65
$2.50 < \leq 3.00$	0.25	0.30	0.40	0.60
$3.00 < \leq 3.50$	0.20	0.30	0.40	0.55
$3.50 < \leq 4.00$	0.20	0.25	0.35	0.50
$4.00 < \leq 6.00$	0.15	0.20	0.25	0.40
$6.00 < \leq 8.00$	0.10	0.15	0.20	0.35
$8.00 < \leq 10.0$	0.10	0.10	0.20	0.30
$10.0 < \leq 25.0$	0.05	0.10	0.15	0.25
$25.0 < \leq 50.0$	0.05	0.05	0.05	0.15
$50.0 <$	0.00	0.00	0.05	0.05



S_{Inc-lc} / S_{Inc-Ex}	$U_{V,ue} (W/m^2 K)$			
	0.0	0.3	3.0	9.0
≤ 0.25	0.35	0.50	0.85	0.95
$0.25 < \leq 0.50$	0.20	0.35	0.70	0.90
$0.50 < \leq 0.75$	0.15	0.25	0.65	0.85
$0.75 < \leq 1.00$	0.15	0.20	0.55	0.80
$1.00 < \leq 1.25$	0.10	0.15	0.50	0.75
$1.25 < \leq 2.00$	0.05	0.10	0.40	0.65
$2.00 < \leq 2.50$	0.05	0.10	0.35	0.60
$2.50 < \leq 3.00$	0.05	0.10	0.30	0.55
$3.00 < \leq 3.50$	0.05	0.05	0.25	0.50
$3.50 < \leq 4.00$	0.05	0.05	0.25	0.45
$4.00 < \leq 6.00$	0.00	0.05	0.20	0.35
$6.00 < \leq 8.00$	0.00	0.05	0.15	0.30
$8.00 < \leq 10.0$	0.00	0.05	0.10	0.25
$10.0 < \leq 25.0$	0.00	0.00	0.10	0.20
$25.0 < \leq 50.0$	0.00	0.00	0.05	0.10
$50.0 <$	0.00	0.00	0.00	0.05



S_{Inc-lc} / S_{Inc-Ex}	$U_{V,ue} (W/m^2 K)$			
	0.0	0.3	3.0	9.0
≤ 0.25	0.80	0.90	0.95	1.00
$0.25 < \leq 0.50$	0.65	0.80	0.95	1.00
$0.50 < \leq 0.75$	0.55	0.70	0.90	0.95
$0.75 < \leq 1.00$	0.50	0.65	0.90	0.95
$1.00 < \leq 1.25$	0.45	0.60	0.90	0.95
$1.25 < \leq 2.00$	0.35	0.45	0.80	0.95
$2.00 < \leq 2.50$	0.30	0.40	0.80	0.90
$2.50 < \leq 3.00$	0.25	0.35	0.75	0.90
$3.00 < \leq 3.50$	0.20	0.35	0.70	0.90
$3.50 < \leq 4.00$	0.20	0.30	0.70	0.85
$4.00 < \leq 6.00$	0.15	0.25	0.60	0.80
$6.00 < \leq 8.00$	0.10	0.20	0.55	0.75
$8.00 < \leq 10.0$	0.10	0.15	0.45	0.70
$10.0 < \leq 25.0$	0.05	0.10	0.40	0.65
$25.0 < \leq 50.0$	0.05	0.05	0.25	0.45
$50.0 <$	0.00	0.05	0.10	0.30

R_{si} : la résistance d'échange thermique superficielle intérieure ($m^2 K/W$).

R_i : les résistances thermiques de chaque couche de construction ($m^2 K/W$).

R_{se} : la résistance d'échange thermique superficielle extérieure ($m^2 K/W$).

Pour les surfaces planes, les valeurs des résistances thermiques qui seront retenues sont données par le tableau III.2 suivant [15-17].

Tableau III.2 : Valeurs retenues des résistances thermiques superficielles.

	Direction du flux de chaleur		
	Ascendant	Horizontal	Vers le bas
R_{si} ($m^2 K/W$)	0.10	0.13	0.17
R_{se} ($m^2 K/W$)	0.04	0.04	0.04

Le coefficient de transmission thermique des parois vitrées de l'ensemble fenêtre-occultation est calculé en supposant qu'il existe une lame d'air immobile entre la fenêtre et l'occultation. Les coefficients K_i ($W/m^2 \text{ } ^\circ C$) des vitrages nus sont donnés dans le tableau ci-dessous.

r_v : (en $m^2 \text{ } ^\circ C/W$) représente la résistance supplémentaire des voilages éventuels, on adopte $r_v = 0.025 m^2 \text{ } ^\circ C/W$,

r_{rid} : (en $m^2 \text{ } ^\circ C/W$) représente la résistance supplémentaire des rideaux éventuels, on adopte $r_{rid} = 0.030 m^2 \text{ } ^\circ C/W$,

r_{occ} : (en $m^2 \text{ } ^\circ C/W$) représente la résistance supplémentaire des occultations (si elles existent), sa valeur se rapproche de $0.17 m^2 \text{ } ^\circ C/W$,

r_{occ} : est supposée nulle en absence des occultations.

Les occultations sont les systèmes associés aux vitrages permettant de constituer une isolation thermique nocturne (volets, stores,...). Le coefficient U_i des parois vitrées est donné par la formule suivante :

$$\frac{1}{U_i} = \frac{1}{K_i} + r_v + r_{rid} + r_{occ} \quad (III.12)$$

La même démarche optée pour le calcul du coefficient de réduction des déperditions bi d'une paroi opaque reste valable même pour une paroi vitrée.

Les valeurs à retenir pour les calculs des coefficients des vitrages nus et la composition et les propriétés des constituants de la maçonnerie sont données respectivement par les tableaux III.3 et III.4 [14].

Tableau III.3 : Coefficients des vitrages nus K_i des parois vitrées [14].

Type de vitrage	Épaisseur de la lame d'air (en mm)	Nature de la menuiserie	Paroi verticale	Paroi horizontale
Vitrage simple	/	Bois	5.0	5.5
		Métal	5.8	6.5
Vitrage double	5 à 7	Bois	3.3	3.5
		Métal	4.0	4.3
	8 à 9	Bois	3.1	3.3
		Métal	3.9	4.2
	10 à 11	Bois	3.0	3.2
		Métal	3.8	4.1
	12 à 13	Bois	2.9	3.1
		Métal	3.7	4.0
Double fenêtre	plus de 30	Bois	2.6	2.7
		Métal	3.0	3.2

Tableau III.4 : Composition de la maçonnerie et propriétés des matériaux de construction de notre habitat [14].

	Matériau de construction	Épaisseur (m)	Conductivité thermique (W/mK)	Résistance thermique (m^2K/W)
Murs extérieurs	Ciment mortier	0.015	1.4	0.01
	Brique creuse	0.20	/	0.39
	Ciment mortier	0.015	1.4	0.01
	Enduit Plâtre	0.02	0.35	0.057
Toit	Dalle de ciment	0.05	1.15	0.043
	Hourdi	/	/	0.19
	Enduit Plâtre	0.02	0.35	0.057
Sol	Carrelage	0.025	2.6	0.0096
	Ciment	0.03	1.4	0.021
	Sable sec	0.02	0.6	0.033
	Sable+gravillons	0.30	1.2	0.25
Fenêtre en bois avec un simple vitrage				0.255
Porte en métal				0.17
Pont thermique				0.34

Les déperditions thermiques dues aux ponts thermiques sont données par l'équation suivante [15-17]:

$$\begin{aligned}
 DP_{\text{ponts thermiques}} = & \sum_{i,j} b_{pb_i/m_j} k_{pb_i/m_j} l_{pb_i/m_j} + \\
 & \sum_{i,j} b_{pi_i/m_j} k_{pi_i/m_j} l_{pi_i/m_j} + \sum_{i,j} b_{ph_i/m_j} k_{ph_i/m_j} l_{ph_i/m_j} + \quad (III.13) \\
 & \sum_{i,j} b_{rf_i/m_j} k_{rf_i/m_j} l_{rf_i/m_j} + \sum_{i,j} b_{men_i/m_j} k_{men_i/m_j} l_{men_i/m_j}
 \end{aligned}$$

l_{pb_i/m_j} : longueur du pont thermique, plancher bas i - mur j.

l_{pi_i/m_j} : longueur du pont thermique, étage intermédiaire i - mur j.

l_{ph_i/m_j} : longueur du pont thermique, étage supérieur i - mur j.

l_{rf_i/m_j} : longueur du pont thermique, mur de cisaillement i- mur j.

$$l_{rf_i/m_i} = 2 h_{\text{Moy_Plaf}} (N_{\text{appart}} - N_{\text{niv}}) \quad (III.14)$$

$h_{\text{Moy_Plaf}}$: la hauteur moyenne du plafond.

N_{appart} : nombre d'appartements.

N_{niv} : nombre de niveaux.

l_{men_i/m_j} : la longueur du pont thermique, charpenterie i - mur j.

k : conductivité thermique (W/m K).

Il est à signaler que l étant estimé en mètres

Pour calculer les déperditions thermiques dues à la ventilation, il faut se baser sur les données suivantes:

- Menuiserie: avec ou sans joint.
- Surface adjacente avec l'extérieur à l'exception du plancher bas.
- Surface habitable.
- Type de ventilation.

La ventilation des locaux est une obligation et un débit minimal doit être assuré afin d'éviter les inconforts. Afin de réduire les dépenses énergétiques, un soin tout particulier doit être apporté au choix et à la mise en œuvre des composants. L'étanchéité doit être réalisée le mieux possible car les fuites dans les parties chauffées augmentent les débits entrants et donc les déperditions. Le défaut d'étanchéité de l'enveloppe du bâtiment (perméabilité) joue aussi un grand rôle dans les déperditions thermiques. Ces défauts d'étanchéité sont multiples:

- Joints des ouvrants de mauvaise qualité.
- Linéiques des ouvrants non rendus étanche par application de mousse expansive ou tous autres procédés.
- Appuis de fenêtres scellés sur les cotés mais non par le dessous.
- Murs extérieurs en maçonnerie courante, briques ou parpaings, maçonnés avec trop de jeu...etc.

$$DP_{\text{Ventil}} = 0.34 qv_{\text{en}} \quad (\text{III.15})$$

DP_{ventil} : déperditions thermiques dues au système de ventilation par degré de différence en température entre l'intérieur et l'extérieur (W/K).

qv_{en} : est le débit d'air équivalent transitant dans le logement (m^3/h).

0.34 : est la capacité thermique volumique de l'air, en $\text{Wh}/\text{m}^3.\text{K}$.

$$qv_{\text{en}} = qv_{\text{Fen}_H} + qv_{\text{Fen}_S} + qv_{\text{Comb}} + qv_{\text{vmc}} + qv_{\text{perm}} + qv_{\text{conde}} \quad (\text{III.16})$$

Si un ou plusieurs des débits ne sont pas utilisés, ils ont pour valeur 0 m^3/h .

qv_{Fen_H} : est le débit d'air d'aération quand les fenêtres sont utilisées comme système de ventilation d'hygiène (m^3/h)

$$qv_{\text{Fen}_H} = 1.8 D_{\text{Hyg}} \quad (\text{III.17})$$

D_{Hyg} est le débit d'hygiène (m^3/h).

qv_{Fen_S} : est le débit supplémentaire (en m^3/h) dans le cas où l'ouverture des fenêtres vient en complément du système spécifique (aspect comportemental de l'occupant)

$$qv_{\text{Fen}_S} = 1800 (0.01 Sp) F_{\text{ouv}} v_{\text{fen}} \quad (\text{III.18})$$

Sp : la surface de la pièce, exprimée en m^2 .

$$F_{\text{ouv}} = 0.6 \text{Max}(0, 0.004 T_{\text{ext}} + 0.2) \quad (\text{III.19})$$

$$v_{\text{fen}} = 0.5 (0.026 + 0.00525 \Delta T) \quad (\text{III.20})$$

qv_{Comb} : est le débit supplémentaire extrait (m^3/h) lié au fonctionnement des appareils à combustion quand ils se trouvent dans les pièces chauffées.

$$q_{v_{comb}} = \begin{cases} 0.002 P_{Chauf} & \text{pour les VMC gaz} \\ 0.003 P_{Chauf} & \text{pour les autres} \end{cases} \quad (III.21)$$

P_{Chauf} : est la puissance fournie par le système de chauffage par unité de surface (W/m^2)

$$P_{Chauf} = 1.2 (H_T + H_V) \Delta T \quad (III.22)$$

H_T : le coefficient de déperdition par transmission ($W/m^2 K$). Afin de simplifier, il est possible d'utiliser la formule utilisant le coefficient $U_{bât}$. Sa valeur doit être retenue conformément au tableau III.5 suivant.

Tableau III.5 : Valeurs retenues du coefficient de déperdition par transmission du bâti $U_{bât}$ [15-16].

Type de logement	Valeur de $U_{bât}$
Non isolé	1.40
Mal isolé	1.20
Bien isolé	1.00
Très bien isolé	0.90
Conforme à la réglementation thermique en vigueur	0.75

H_V : est le coefficient de déperdition par renouvellement d'air ($W/m^2 K$). Il est possible d'utiliser les débits d'hygiène majorés de 30 % pour tenir compte des autres déperditions.

ΔT : est la différence entre la température de la pièce et celle de base (K).

$q_{v_{vmc}}$: est le débit d'air extrait par la ventilation mécanique (m^3/h). Le débit $q_{v_{vmc}}$ est corrigé par les coefficients C_d et C_{fr} comme suit:

$$q_{v_{vmc}} = D_{Hyg} C_d C_{fr} \quad (III.23)$$

Le coefficient de dépassement C_d est un facteur multiplicatif des débits d'hygiène visant à prendre en compte les contraintes de dimensionnement de l'installation de ventilation et la dispersion des caractéristiques de composants. $C_d = 1.15$ dans le cas où le matériel est certifié, 1.30 dans les autres cas. Le coefficient de fuite du réseau C_{fr} est une valeur par défaut; 0.833 en basse pression ($< 20 Pa$) ou 2.5 dans les autres cas.

$q_{v_{perm}}$: débit de fuite de l'enveloppe (m^3/h)

$$qv_{perm} = A_T C_{perm} \quad (III.24)$$

La perméabilité de l'enveloppe est représentée par le débit de fuite (en m³/h) sous une dépression de 4 pascals par m² de surface de l'enveloppe. La surface de l'enveloppe considérée est la surface des parois déperditives A_T.

A_T : la surface intérieure totale des parois qui séparent le volume chauffé de l'extérieur, du sol et des locaux non chauffés, en m², dont on exclut les planchers bas.

La valeur par défaut de la perméabilité de l'enveloppe est calculée en multipliant la surface d'enveloppe A_T par la valeur de perméabilité (en m³/h.m² sous 4 Pa) donnée dans le tableau III.6.

Tableau III.6: Valeur de perméabilité [15-16].

Usage	C _{perm}
Logements individuels	1.3
Logements collectifs	1.7
Autres usages	3

qv_{condext} : le débit d'air extrait par les conduits à tirage naturel.

Pour connaître le débit, il faut connaître les différentes pertes de charge, perte de charge linéique du conduit ΔP_{cond}, perte de charge singulière des coudes ΔP_{coude}, perte de charge singulière de la bouche ΔP_{bouche}. Ainsi que la force motrice due à la différence de densité entre l'air chaud du logement et l'air extérieur ΔP_{mot}.

Exemple d'application pour le calcul de qv_{condext} [18] :

- Suppositions

T_{ext} et T_{int} étant respectivement la température extérieure et intérieure.

T_{int} = 20 °C et T_{ext} = 0 °C.

M: la masse d'air (kg). Par définition :

$$M_{Air_froid} = 1.293 \frac{273.15}{273.15 + T_{ext}} \quad (III.25)$$

$$M_{\text{Air_chaud}} = 1.293 \frac{273.15}{273.15 + T_{\text{int}}} \quad (\text{III.26})$$

Soit,

$$M_{\text{Air_froid}} = 1.293 \cdot 273.15 / (273.15 + 0) = 1.293 \text{ kg/m}^3.$$

$$M_{\text{Air_chaud}} = 1.293 \cdot 273.15 / (273.15 + 20) = 1.204786 \text{ kg/m}^3.$$

La dépression motrice est donc égale à

$$\Delta P_{\text{mot}} = (1.293 - 1.204786) h g,$$

Où

h : la hauteur en m du conduit de ventilation de l'axe de la bouche en haut du conduit.

g : l'accélération de la pesanteur égale à 9.81 m/s^2 .

Ceci nous donne un coefficient de $(1.293 - 1.204786) \times 9.81 = 0.865 \text{ Pa/m}$.

Comme les valeurs par défaut sont $T_{\text{int}} = 20 \text{ }^\circ\text{C}$ et $T_{\text{ext}} = 0 \text{ }^\circ\text{C}$, il suffit de multiplier 0.865 par la hauteur du conduit pour obtenir la dépression motrice ΔP_{mot} .

Si le conduit est de forme rectangulaire ou carré, son diamètre équivalent $D_{\text{équiv}}$ doit être utilisé. $D_{\text{équiv}} = 4 A / P$, où A est la section en m^2 du conduit et P le périmètre en m.

Pour obtenir les différentes pertes de charge, il a fallu utiliser les formules suivantes :

$$\Delta P_{\text{cond}} = 1.5 \cdot 0.05 L / D_{\text{équiv}} M_{\text{Air_chaud}} / 2 v^2,$$

Où

v : la vitesse en m/s .

L : la longueur du conduit (si il y a des coudes, L est $< >$ de h).

$$\Delta P_{\text{coude}} = 1.15 M_{\text{Air_chaud}} / 2 v^2 N_{\text{coude}},$$

Où

N_{coude} : est le nombre de coudes.

$$\Delta P_{\text{bouche}} = 2.5 M_{\text{Air_chaud}} / 2 v^2,$$

Pour connaître le débit en m^3/h , il est nécessaire de connaître la vitesse en m/s . Comme les pertes de charge sont fonction de la vitesse de l'air dans le conduit, une vitesse limite ne peut être dépassée. C'est à dire la perte de charge totale ne pourra excéder la dépression = à ΔP_{mot} . Il va donc falloir procéder par itération pour trouver la vitesse du fluide sans pour autant dépasser la dépression motrice. Pour cet exercice, un outil informatique est conseillé. Une fois la vitesse connue, il suffit d'utiliser la formule suivante pour connaître le débit en m^3/h :

$$\text{Débit} = v \cdot A \cdot 3600,$$

En considérant que :

$$h = 7 \text{ m}, L = 8 \text{ m}, A = 0.2 \times 0.2 = 0.04 \text{ m}^2, N_{\text{coude}} = 2$$

$$P_{\text{mot}} = 0.865 \times 7 = 6.05 \text{ Pa}$$

$$\text{En outre, } P = 0.2 \times 4 = 0.8 \text{ m}, D_{\text{équiv}} = 4 \times 0.04 / 0.8 = 0.2 \text{ m}$$

La perte de charge totale n'excédant pas 6.05 Pa

$$\Delta P_{\text{cond}} + \Delta P_{\text{coude}} + \Delta P_{\text{bouche}} \leq \Delta P_{\text{mot}}$$

$$1.5 \times 0.05 \times (8 / 0.2) \times (1.204786/2) \times v^2 + 1.15 \times 1.204786/2 \times v^2 \times 2 + 2.5 \times 1.204786/2 \times v^2 \leq 6.05$$

$$4.6987 v^2 \leq 6.05 \Leftrightarrow v^2 \leq 1.2876 \Leftrightarrow v \leq 1.135$$

La vitesse du fluide pour une perte de charge totale n'excédant pas 6.05 Pa est de 1.135 m/s , ce qui donne comme pertes de charge pour chaque poste :

$$\Delta P_{\text{cond}} = 1.5 \times 0.05 \times (L / 0.2) \times (1.204786 / 2) \times v^2 = 2.33$$

$$\Delta P_{\text{coude}} = 1.15 \times 1.204786 / 2 \times v^2 \times 2 = 1.78$$

$$\Delta P_{\text{bouche}} = 2.5 \times 1.204786 / 2 \times v^2 = 1.94$$

Ceci donne une perte de charge totale de $2.33 + 1.78 + 1.94 = 6.05 \text{ Pa}$ qui est égale à la dépression motrice. Le débit en m^3/h est donc de $qV_{\text{condext}} = 1.135 \times 0.04 \times 3600 = 163.44 \text{ m}^3/\text{h}$

III.2.2. Besoins en eau chaude sanitaire

L'expérience a montré que les besoins raisonnables se situaient entre 25 et 60 litres d'eau chaude à 50 °C par jour par personne. Pour effectuer les calculs, deux valeurs par défaut peuvent être utilisées, 50 litres par

personne par jour, ou 1.75 litres par m² de surface habitable. Ces valeurs ont été retenues pour tous les jours du mois en question. Si le volume est connu, le calcul des besoins en eau chaude sanitaire doit être fait par jour puis multiplié par le nombre de jours du mois considéré. Si le volume est différent les jours de la semaine et le Week-end, une moyenne journalière peut être faite puis multipliée par le nombre de jours du mois considéré. La formule utilisée pour connaître la quantité de chaleur nécessaire à la production de l'eau chaude sanitaire est [15, 16, 18]:

$$Q_{ECS} = \rho \cdot 1.1628 \cdot V_{ECS} (T_{ECS} - T_{ef}) \quad (III.27)$$

Q_{ECS} : l'énergie nécessaire à la production de l'eau chaude sanitaire pour la journée, en Wh.

ρ : la masse volumique de l'eau en fonction de sa température T_{ef} , elle peut être prise égale à 1 kg/litre.

V_{ECS} : le volume d'eau (par litres) retenu pour les calculs.

$$V_{ECS} = 50 N_{Pers} \quad (III.28)$$

$$V_{ECS} = 1.75 A_{Bât} \quad (III.29)$$

Pour notre application, il nous convient de retenir la première formule.

N_{Pers} : le nombre de personnes occupant le logement.

$A_{Bât}$: la surface habitable du logement, en m².

T_{ECS} : la température de l'eau chaude au point de soutirage, en °C.

T_{ef} : la température moyenne de l'eau froide du mois considéré entrant dans le ballon ou le serpentin de production d'eau chaude sanitaire (production instantanée), en °C.

III.2.3. Apports internes liés aux occupants

- Première approche (retenue pour nos calculs)

L'être humain génère de la chaleur pour le maintien de ses fonctions corporelles. Cette chaleur résulte de la combustion des aliments ingérés avec l'oxygène respiré. Plus l'effort du corps humain est élevé, plus la quantité de chaleur diffusée est élevée. Le tableau III.7 formule une

estimation chiffrée de la diffusion de chaleur en fonction de l'activité pratiquée par la personne. Lors de l'exécution d'activités simples de bureau, un être humain de résistance et de taille moyenne diffuse une chaleur moyenne d'environ 120 watts. Pour des travaux simples à la maison, au bureau ou dans un atelier une chaleur d'environ 150 watts est retenue. Celle-ci peut s'élever pour des tâches moyennes à difficiles à plus de 200 watts.

Tableau III.7: Diffusion de chaleur par personne [15, 16, 18].

Niveau d'activité	Exemples d'activité	Diffusion de chaleur par personne (sensible et latente)
1	Activité statique assise (lire et écrire par exemple)	120 W
2	Travaux simples assis ou debout, travail en laboratoire, machine à écrire	150 W
3	Activités corporelles légères	190 W
4	Activités corporelles moyennes à difficiles	Plus de 200 W

Les apports dus aux occupants sont donnés par [15, 16, 19]:

$$Q_{Occup} = C_p N_{Pers} D_{pres/jour} N_{Jch} \quad (III.30)$$

C_p : la chaleur dégagée par occupant (W/occupant).

$D_{pres/jour}$: la durée de présence par jour (h/jour).

N_{Jch} : le nombre de jours chauffés (jours/an).

- Deuxième approche

On estime qu'une personne normalement habillée et assise, donc sans activité physique, dans une ambiance calme à environ 20 °C, émet à peu près 119 W. Si la personne a une activité plus physique, cette émission peut monter jusqu'à 300 W. Bien évidemment, ces valeurs ne sont pas absolues car les émissions dépendent du sexe, de la corpulence et du moment de la journée. Comme il est assez difficile de définir la quantité d'énergie que peut produire les occupants et leurs modes de vie, une valeur par défaut de 4 Watts par m² de surface habitable est proposée par la RT 2000 [15, 16, 18].

$$Q_{Occup} = 4 A_{Bât} 24 \quad (III.31)$$

24 : la durée en heure de la journée.

III.2.4. Apports internes liés à l'éclairage et aux ménagers

Les machines électriques, en raison même de leur fonctionnement, émettent une certaine quantité de chaleur dans l'ambiance. Les moteurs électriques dégagent des quantités de chaleur qui dépendent de leur rendement propre de conversion d'énergie électrique en énergie mécanique. Les appareils à gaz génèrent de la chaleur et produisent de l'humidité. Pour les appareils électriques, il n'existe pas de méthode de calcul universelle qui puisse être appliquée pour calculer les apports, ni la répartition sensible/latente de cette chaleur. Dans certaines références, il a été proposé quelques valeurs de gains en chaleur pour différents appareils électroménagers. Le tableau III.8 donne un modèle indicatif de diffusion de chaleur.

Tableau III.8: Diffusion de chaleur générée par éclairage et équipements (étude de cas) [15, 16, 18].

Type d'équipement	Durée (Heure), modes et puissance de fonctionnement (Watts)				Energie (Wh)
	En veille		En fonctionnement		
TV LCD + démo intégré	Mode 1 20	Nombre d'heures 19	Mode 2 78	Nombre d'heures 5	770
Réfrigérateur (250 litres)	La moyenne horaire est de 23.0833 W				554
Ordinateur portable	Mode 1 27	Nombre d'heures 20	Mode 2 187	Nombre d'heures 4	1288
Éclairage des lampes de type LED	La moyenne horaire de la diffusion de la chaleur des lampes est de 18.75 W				112.5
Divers					857.5
Total par jour					3 582

III.2.5. Consommation (charge) électrique journalière

Pour calculer la consommation électrique journalière d'un appareil électrique, il faut prendre en considération 3 données:

- la puissance de l'appareil électrique exprimée en watts.

- le nombre d'heures par jour pendant lesquelles l'appareil fonctionne.
- le nombre de jours par an pendant lesquels l'appareil fonctionne.

Le calcul est le suivant [15, 16, 18]:

$$[\text{nombre d'heures d'utilisation}] \times [\text{nombre jours d'utilisation}] \times ([\text{puissance appareil en watts}] / 1000) = \text{nombre de kWhs} \quad (\text{III.32})$$

La puissance est divisée par 1000 pour convertir le nombre de watts en kilowatts. On obtient ainsi le nombre de kWh (kilowattheures). Quoique, il est possible de dresser des exemples indicatifs comme le montre le tableau III.9.

Tableau III.9: Consommation moyenne de l'éclairage et des appareils électroménagers par jour (étude de cas) [15, 16, 18].

Type d'équipement	Puissance (W)		Durée d'utilisation par jour (heure)	Consommation journalière moyenne (Wh)	
	Valeurs opératoires	Valeurs retenues			
TV LCD avec Démo intégré	en service en veille	90 à 250 3	150 3	5 19	807
Réfrigérateur (250 litres)		/	/	/	500
Eclairage : 6 lampes économiques		3 à 13	/	6 (Séjour) 3 (Cuisine) 1 (SDB) 2 (Chambre1) 2 (Chambre 2) 4 (Hall)	171
Ordinateur portable	en service en veille	70 à 80 3	75 /	4 20	320
Chargeur de portable		6	/	3	18
Total par jour (Wh)					1816 /jour

III.2.6. Apports solaires

Les apports solaires dépendent de l'ensoleillement présent sur le site et des surfaces réceptrices équivalentes en fonction des différentes orientations. Pour une période de calcul donnée, les apports solaires se calculent comme suit [15, 16, 18]:

$$Q_{\text{Solaire}} = \sum_j I_j \sum_n A_{nj} \quad (\text{III.33})$$

La première somme s'effectue sur toutes les orientations j, (Horizontal, Nord, Sud, Est, Ouest, Nord-Est, Nord-Ouest, Sud-Est, Sud-Ouest ...etc.).

La seconde s'effectue sur toutes les surfaces n d'orientations j qui captent le rayonnement solaire.

I_j : l'irradiation solaire sur une surface unitaire ayant l'orientation j.

A_{nj} : l'aire réceptrice équivalente de la surface ayant l'orientation j. Elle est calculée comme suit [15, 16, 18]:

$$A_S = A F_{Omb} F_{Red} g \quad (III.34)$$

A : l'aire de la baie (m^2).

F_{Red} : le facteur de réduction pour les encadrements des vitrages, égale au rapport de l'aire de la surface transparente à l'aire totale de la menuiserie vitrée;

F_{Omb} : le facteur d'ombre, il est défini par l'utilisateur pour des raisons simplificatrices, et peut être calculé par [15, 16, 18]:

$$F_{Omb} = F_{Omb_R} F_{Omb_S} \quad (III.35)$$

F_{Omb_R} : le facteur d'ombre des rideaux;

F_{Omb_S} : le facteur d'ombre de la surface qui peut être calculé par:

$$F_{Omb_S} = F_{Cor_h} F_{Cor_Sur} F_{Cor_Ecr} \quad (III.36)$$

F_{Cor_h} : le facteur de correction pour l'horizon;

F_{Cor_Sur} : le facteur de correction pour les surplombs;

F_{Cor_Ecr} : le facteur de correction pour les écrans latéraux;

g : le facteur solaire de la baie.

Le facteur solaire utilisé dans cette formule est en principe la moyenne dans le temps du rapport de l'énergie traversant l'élément exposé à l'énergie incidente sur celui-ci, en l'absence d'ombrage. Certaines valeurs figurent dans le tableau III.10 ci-dessous. Ces valeurs correspondent à l'incidence normale, avec une surface propre.

Tableau III.10 : Facteurs solaires pour les deux types de vitrages les plus courants [15, 16, 18].

Type de vitrage	g
Vitrage simple	0.85
Double vitrage clair	0.75

III.3. Diagnostic et évaluation des besoins énergétiques "sans aucun concept"

L'objectif est d'estimer les besoins énergétiques mensuels et annuels d'une habitation soumise à des conditions climatiques sahariennes cas de Ghardaïa. Le tableau III.11 donne en chiffres les besoins mensuels de chauffage et de refroidissement nécessaires correspondants à l'année 2017 en cas de la région de Ghardaïa. Les paramètres d'entrée sont les suivants: T_{ext} la température ambiante extérieure, T_{ef} la température de l'eau froide qui varie en fonction du mois en question, $T_{ECS} = 50$ °C la température de l'eau chaude sanitaire retenue, $N_{Pers} = 5$ personnes, $D_{pres} / jour = 14h$.

En vue d'estimer le volume d'eau à fournir, il nous convient d'utiliser l'équation III.28. T_{Conf} sera calculée en fonction de T_{ext} en se servant de l'équation d'Auliciems suivante [15, 16, 18]:

$$T_{Conf} = 17.8 + 0.31T_{ext} \quad (III.37)$$

Les gains solaires directs ne sont pas pris en compte. Les quantités énergétiques calculées sont utilisées pour assurer un confort permanent dans toutes les zones de l'habitat. La méthode des degrés-jours a été introduite pour les calculer. Donc Dj est le nombre de degrés-jours de chauffage et / ou de refroidissement.

Les données rapportées au tableau montrent que le chauffage est exigé du mois de novembre au mois de mars. Les mois d'octobre et d'avril correspondent à des phases de transition (intersaison). Le processus du refroidissement se déclenche au mois de mai et se termine le mois de septembre.

Tableau III.11 : Consommation énergétique mensuelle et annuelle requise pour maintenir une température du confort T_{Conf} .

Mois	T_{ext} par °C	T_{Conf} Par °C	T_{ef} Par °C	Dj	$Q_{enveloppe}$ par kWh	Apports internes		Besoin en eau chaude Q_{ECS} à $T_{ECS} = 50$ °C par kWh	$Q_{cons\ Eic}$ par kWh	Q_{Tot} par kWh
						Q_{occup} par kWh	Q_{Eic} par kWh			
Janvier	9.7016	20.8075	07.00	344.2828	8492.6685	348.7500	111.0420	387.5031	56.2960	8476.6756
Février	14.5837	22.3209	09.00	216.6429	5337.6183	315.0000	100.2960	333.7236	50.8480	5306.8939
Mars	18.1241	23.4185	11.50	164.1255	4036.1169	348.7500	111.0420	346.9504	56.2960	3979.5714
Avril	21.3549	24.4200	13.20	91.9536	2255.7551	337.5000	107.4600	320.9328	54.4800	2186.2079
Mai	28.4243	26.6115	15.80	56.1958	1378.6251	348.7500	111.0420	308.2001	56.2960	2202.9132
Juin	31.3799	27.5278	18.50	115.5639	2851.1983	337.5000	107.4600	274.7115	54.4800	3625.3498
Juillet	34.1328	28.3812	19.30	178.3006	4424.5161	348.7500	111.0420	276.6592	56.2960	5217.2633
Août	33.7741	28.2700	19.10	170.6280	4230.8239	348.7500	111.0420	278.4615	56.2960	5025.3734
Septembre	29.4333	26.9243	18.00	75.2693	1850.0101	337.5000	107.4600	279.0720	54.4800	2628.5221
Octobre	24.9839	25.5450	15.80	17.3944	425.1767	348.7500	111.0420	308.2001	56.2960	399.1114
Novembre	15.8793	22.7226	12.30	205.2985	5055.1359	337.5000	107.4600	328.7817	54.4800	4993.4376
Décembre	11.2839	21.2980	08.00	310.4374	7656.1119	348.7500	111.0420	378.4914	56.2960	7631.1073
Total (kWh)					47993.7568	4106.25	1307.43	3821.6876	662.8400	51672.4269

Les valeurs obtenues de la consommation énergétique indiquent que cet habitat est énergivore, les besoins énergétiques annuels pour une unité de surface habitable sont fixés à 480.58 kWh/m²/an. Entre autres, pour maintenir une température à T_{Conf} dans toutes les zones, y compris la cuisine, la salle de bain, la toilette et le hall, de façon permanente, il faut assurer une consommation qui s'est fixée à 51672.43 kWh/an.

Par ailleurs, l'économie en énergie apportée par les gains internes générés par les activités des occupants, l'éclairage et les équipements électriques, sera calculée par l'équation III.38:

$$\chi = \frac{\sum(Q_{Occup} + Q_{Elc})}{Q_{Tot} - \sum(Q_{Occup} + Q_{Elc})} \times 100 \quad (III.38)$$

L'atténuation de la consommation énergétique est environ 8.70% des besoins totaux en période de chauffage (novembre - mars). Par opposition, l'apport des gains internes est négatif entre mai et septembre. La chaleur rayonnée génère une augmentation de 16.10% par rapport à la consommation totale. La répartition des besoins énergétiques par rapport aux besoins énergétiques totaux est donnée par la figure III.1.

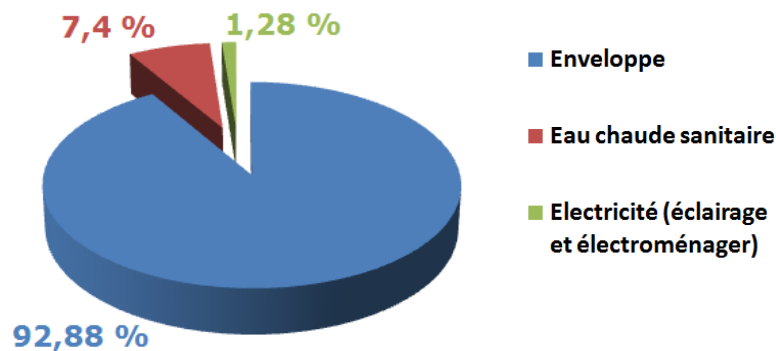


Figure III.1 : Répartition des besoins énergétiques, cas d'une maison énergivore.

L'enveloppe de cette construction saharienne est le principal élément responsable de la forte consommation. Selon les valeurs affichées, la consommation énergétique représente la plus grande part des besoins totaux. Le toit, les murs extérieurs et le sol sont donc les principales

sources de déperditions thermiques. En conséquence, la meilleure façon de les limiter consiste à intégrer une isolation thermique performante.

Par ailleurs, l'énergie utile requise pour le chauffage de l'eau sanitaire varie entre 387.50 kWh en janvier et 274.71 kWh le mois de juin, représente globalement 7.40% de la demande énergétique annuelle. Il est à rappeler que cette énergie est en fonction du nombre d'occupants (5 pour notre cas) et de la température de l'eau froide.

La charge électrique présente 1.28% des besoins énergétiques totaux, elle concerne l'éclairage et l'alimentation d'équipements électroménagers.

III.4. Intégration des concepts passifs et actifs

L'efficacité énergétique d'un habitat est influencée par les éléments architecturaux connus qui ont des différentes fonctionnalités. L'objectif s'est focalisé d'abord sur l'influence de certains éléments dit "passifs" à savoir: les apports solaires gratuits, la compacité et le niveau d'isolation thermique. Pour étudier l'effet d'éléments architecturaux actifs, le choix s'est porté sur l'intégration d'un collecteur solaire à tubes sous vides puis un système PV alimentant notre habitat.

III.4.1. Apports solaires gratuits

Les travaux menés dans le chapitre 2 ont montré que l'orientation sud est la plus convenable pour profiter des apports solaires gratuits. En fait, pour étudier l'influence de ce concept passif sur l'efficacité énergétique, il est essentiel de connaître les données mesurées du rayonnement solaire journalier reçu sur toutes les orientations. Pour soulever cette contrainte, il a été adopté une démarche approximative basée sur l'estimation du taux de clarté du ciel qui sera calculé sur la base des données mesurées des irradiances solaires horizontales [18-19]. Les valeurs moyennes des gains solaires journaliers, mensuelles, annuelles et le taux de clarté du ciel sont données par le tableau III.12.

Tableau III.12 : Valeurs mensuelles et annuelles des gains solaires journaliers moyens Q_{Solaire} par unité de surface (kWh/m²) [18-19].

Mois	Taux de clarté (%)	Plan vertical sud (kWh)	Plan vertical est et/ou ouest (kWh)
Janvier	87.677	5.940	2.328
Février	83.464	5.492	2.728
Mars	90.581	4.993	3.407
Avril	87.793	3.460	3.703
Mai	93.097	2.511	3.959
Juin	91.700	1.977	3.885
Juillet	95.097	2.225	3.898
Août	94.190	3.015	3.714
Septembre	90.912	4.049	3.286
Octobre	96.281	5.431	3.036
Novembre	88.867	5.613	2.391
Décembre	84.226	5.455	1.957
Valeur annuelle	90.878	4.180	3.191

Selon les données, en 2017, le taux de clarté du ciel est assez important. Les résultats obtenus peuvent être considérés comme preuve de la disponibilité d'un fort potentiel solaire durant toute l'année.

Les histogrammes tracés sur la figure III.2 attribuent une évaluation des besoins énergétiques mensuels pour deux cas: sans et avec l'intégration des apports solaires. On s'est intéressé à la période du chauffage qui s'étend du mois de novembre au mois de mars. Les chiffres qui apparaissent sur les histogrammes adjacents indiquent le taux d'atténuation des besoins énergétiques du mois en question, en prenant en considération les apports solaires gratuits.

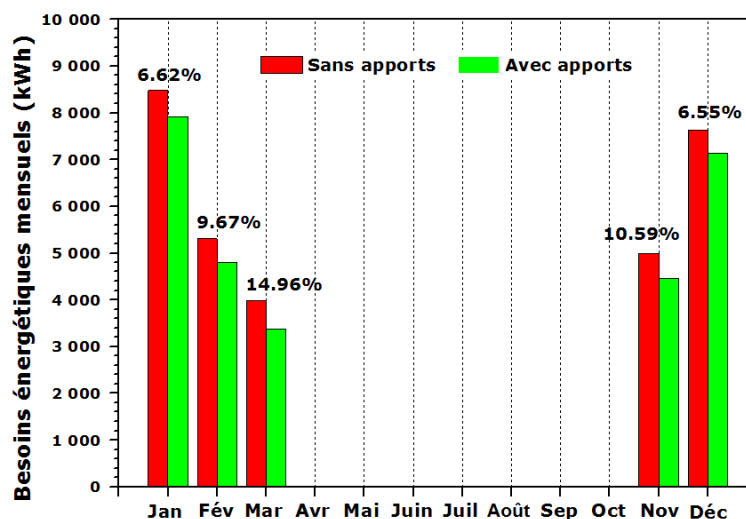


Figure III.2 : Besoins énergétiques mensuels de chauffage, l'effet des apports solaires.

Les résultats indiquent que le chauffage passif gratuit (en profitant des apports solaires) permet de diminuer les besoins énergétiques annuels à une valeur de 48974.08 kWh. En profitant des apports solaires gratuits en période de chauffage, il est possible de minimiser 5.22% des besoins énergétiques annuels. L'économie en énergie (en pourcentage) est plus considérable en mois de mars; c'est raisonnable puisque les besoins sont minimales par rapport aux autres mois. En conséquence, on peut conclure que l'avantage de ce concept est plus quantifié et concret en se rapprochant aux périodes de transition.

III.4.2. Isolation thermique

L'isolation thermique est un concept essentiel en architecture, elle permet de rationaliser l'énergie et améliorer l'efficacité énergétique des bâtiments. L'isolation par l'extérieur est une solution efficace pour réduire les ponts thermiques [19-21].

Dans cette partie, on se base sur l'utilisation d'un isolant à faible coût et de faible conductivité thermique. Le choix s'est porté sur la laine de verre (0.037 W/mK, 10 kg/m³) qui sera incorporée aux murs extérieurs (10 cm), au toit (10 cm) et au sol (10 cm). Pour un habitat bien isolé, la consommation énergétique mensuelle due à l'enveloppe Q_{Envelop} va être radicalement changée. La comparaison entre les deux situations en termes de besoins énergétiques est représentée par la figure III.3.

Les valeurs obtenues montrent que les besoins énergétiques totaux atteignent 19511.75 kWh par an, équivalant à 181.47 kWh/m²/an. Cette réduction présente 62.24% de la consommation globale. Cette technique semble plus rentable en saison froide, le taux de diminution est proche de 69.40%, alors qu'en période de surchauffe l'économie en énergie s'élève à 57.50%. En intersaisons, notamment le mois d'octobre, l'isolation engendre une légère augmentation de la consommation qui a été initialement faible. C'est à cause de la température mensuelle moyenne de l'air ambiant extérieur qui est suffisamment proche de la température désirée du confort. La consommation d'énergie mensuelle correspondante au mois d'octobre due à l'enveloppe Q_{Envelop} est égale à 425.18 kWh.

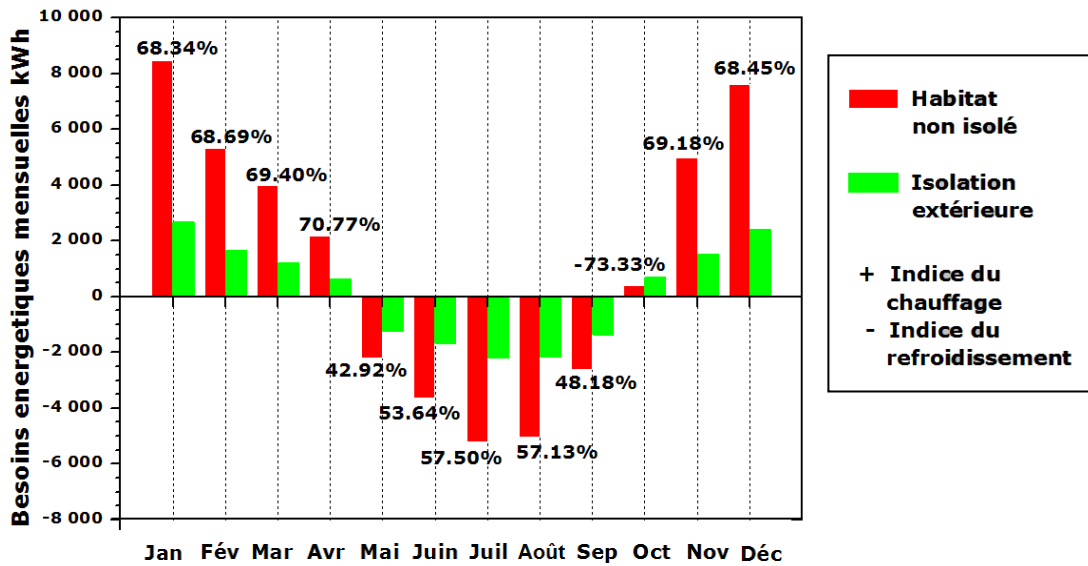


Figure III.3 : Besoins énergétiques mensuels, l'effet de l'isolation thermique.

L'énergie due au gain interne (occupants et équipements électriques...) qui est estimée en faisant la somme de $Q_{Occup} = 348.75$ kWh et $Q_{Elc} = 111.04$ kWh est supérieure à 425.18 kWh. Cette condition provoque une surconsommation faible.

III.4.3. Compacité

La compacité de l'habitat est mesurée par un rapport défini par la surface exposée à l'extérieur S sur le volume V (l'indice de compacité = S / V). Ce rapport est une indication de la vitesse à laquelle un bâtiment se réchauffe pendant la journée et se refroidit pendant la nuit. La compacité est meilleure lorsque l'indice de compacité est le plus faible [21]. L'indice de compacité de la première construction (décrite par la figure II.6) est de 1.05.

Dans cette contribution, nous modifions l'indice de compacité de notre construction en supposant que le toit est en contact avec un espace chauffé. L'habitat dans ce cas se trouve au rez-de-chaussée d'un immeuble de logements. La surface S se réduit à la somme des surfaces des murs et l'indice de compacité diminue à une valeur de 0.72. La figure III.4 représente les besoins énergétiques mensuels et annuels correspondants aux deux cas.

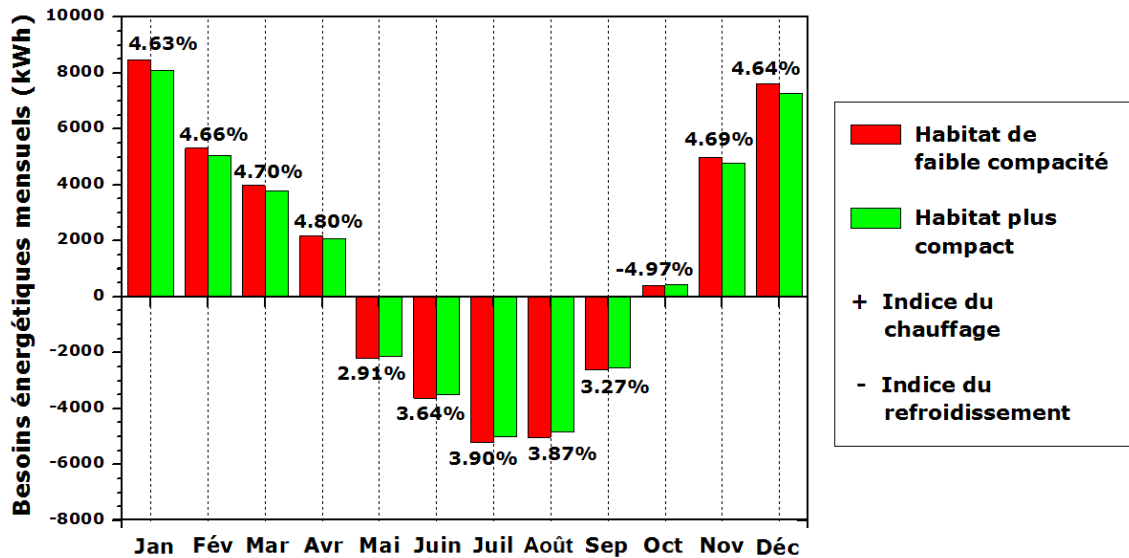


Figure III.4 : Besoins énergétiques mensuels, l'effet de la compacité.

Dans cette figure, nous avons constaté que l'économie en énergie déduite de ce concept, est moins importante durant la période de surchauffe. Elle varie entre 2.91% et 3.90%, c'est-à-dire, dans les meilleurs cas on peut réduire notre consommation de 5217.2633 kWh au 5013.8986 kWh (mois de juillet). En période de chauffage, les valeurs prédites sont légèrement supérieures, la valeur maximale (4.80%) est observée au mois d'avril.

En prenant en compte cette notion d'architecture, on peut bénéficier d'un abaissement annuel en énergie consommée de 4.22% par rapport à l'état initial. La demande en énergie totale va baisser de 51672.43 kWh/an au 49492.45 kWh/an.

III.4.4. Chauffage solaire de l'eau

Les chauffe-eaux solaires sont des systèmes écologiques de production d'eau chaude, ils permettent de chauffer l'eau en utilisant l'énergie du soleil. Ces systèmes utilisent des capteurs installés pour recueillir la chaleur du soleil qui chauffe l'eau stockée dans un ballon d'eau chaude.

En se référant à un capteur sous vide installé sur une terrasse d'un atelier à l'unité de recherche de Ghardaïa, il est déduit que pratiquement ce dispositif peut assurer en moyen pas moins de 150 litres d'eau chaude par jour à 50 °C par mois. Ce chauffe-eau solaire, orienté en plein sud, incliné à 32°, est constitué de 12 collecteurs de type U-pipe remplis par

un fluide caloporteur qui transporte les calories captées vers le ballon du stockage. Ce processus s'effectue en fonctionnant une station solaire intégrée à convection forcée. Le chiffre énoncé (150 litres) coïncide couramment avec celui de la production dans quelques journées dans la période qui s'étend du mois de décembre au mois de février. Il est à rappeler que l'habitat est occupé par cinq personnes, ce qui nécessite 250 litres par jour pour satisfaire leurs besoins en eau chaude sanitaire. En conséquence, notre système de production peut fournir au minimum 60% des besoins mensuels totaux en eau chaude.

Dans notre contribution, nous supposons donc que notre dispositif nous assure 60% de nos besoins énergétiques annuels en eau chaude. La figure III.5 nous montre encore que l'intégration de ce capteur apporte une faible baisse de la demande énergétique totale en cas d'une maison énergivore. Pour ce faire, nous traçons les histogrammes des besoins énergétiques mensuels correspondants.

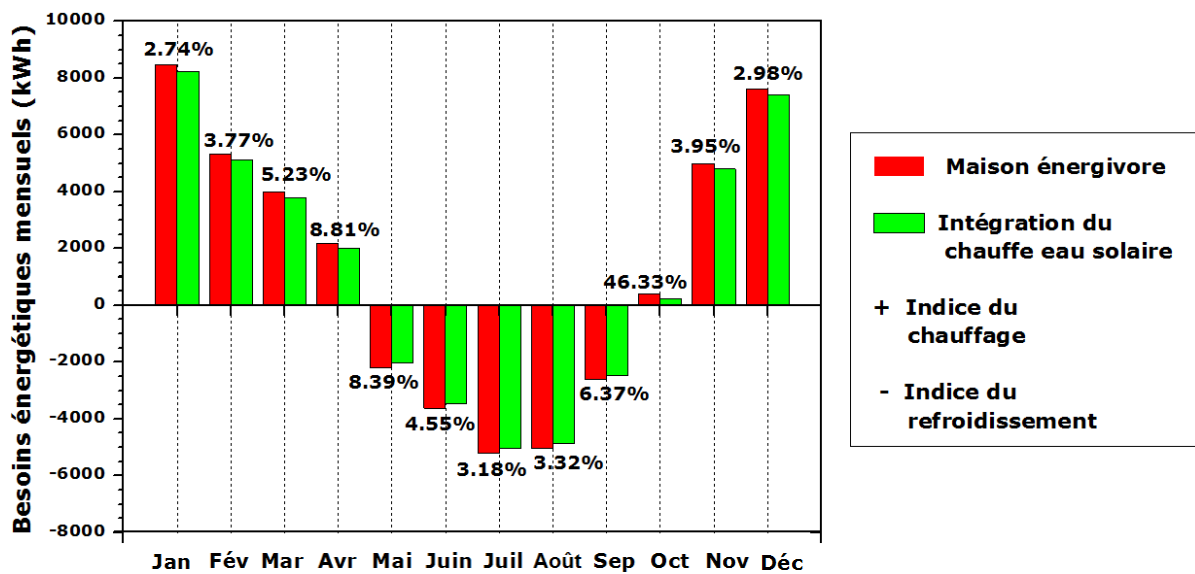


Figure III.5 : Besoins énergétiques mensuels, l'effet de l'intégration d'un chauffe-eau solaire.

Les valeurs enregistrées prouvent que l'utilisation de ce capteur sous vide va permettre aux occupants d'économiser une part intéressante en mois d'octobre. Elle est estimée à 46.33%, cette valeur est très légitime vu que la demande en énergie (399.11 kWh) en ce mois est faible par rapport au

autres. On déduit donc que plus la consommation mensuelle est importante plus l'apport de ce dispositif est moins. La diminution de la consommation énergétique requise en mois de janvier est la plus faible (2.74%) à cause de sa valeur qui affiche un chiffre record (8476.68 kWh). La même chose pour ce concept, l'intégration de ce capteur apporte une faible diminution de la consommation énergétique nette annuelle en cas d'une maison énergivore. L'économie en énergie est de 4.44% par rapport au premier cas.

III.4.5. Intégration d'un système photovoltaïque bien dimensionné

Le système conçu est autonome et alimente les appareils électroménagers et l'éclairage. Conformément au tableau III.9, l'alimentation assure une charge électrique fixée à 1816 Wh /jour. Les calculs sont achevés en considérant que le système assure totalement l'alimentation des appareils électroménagers et les besoins d'éclairage. L'énergie électrique à utiliser le long de l'année sera décrite en attribuant les histogrammes mensuels des besoins énergétiques (figure III.6).

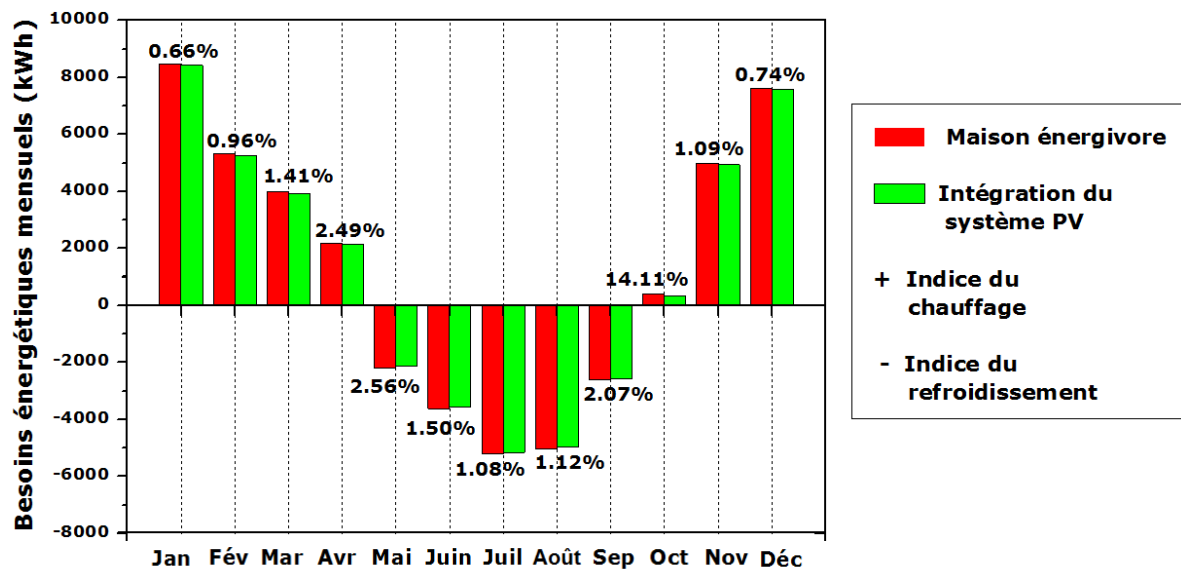


Figure III.6 : Besoins énergétiques mensuels, l'effet de l'intégration d'un système photovoltaïque dimensionné.

En adoptant un système photovoltaïque optimal, on peut avoir une très faible réduction des besoins énergétiques annuels, elle s'estime à 1.28%. Ce taux est inversement proportionnel par rapport aux besoins mensuels.

De façon similaire par rapport aux concepts précédents, l'énergie photovoltaïque produite contribue plus en mois d'octobre pour les mêmes raisons. Elle est de 14.11%. Plus la consommation mensuelle est importante plus l'apport de l'énergie PV produite est moins. Le taux de diminution le plus faible est observé en mois de janvier.

III.4.6. Couplage de concepts énergétiques et architecturaux

L'objectif des concepts énergétiques est d'assurer un approvisionnement énergétique optimal. Dans cette partie, on s'intéresse au couplage des concepts énergétiques pour répondre à l'interaction entre l'enveloppe du bâtiment, l'approvisionnement énergétique et les systèmes énergétiques (PV et chauffage d'eau).

La figure III.7 montre que l'introduction d'un seul concept n'est pas influant sur les besoins énergétiques totaux de cette construction énergivore à l'exception de l'isolation thermique. C'est en raison de l'enveloppe qui présente une source dominante des déperditions thermiques. L'énergie consommée due à cette enveloppe est de 92.88 % de l'énergie totale (figure III.1).

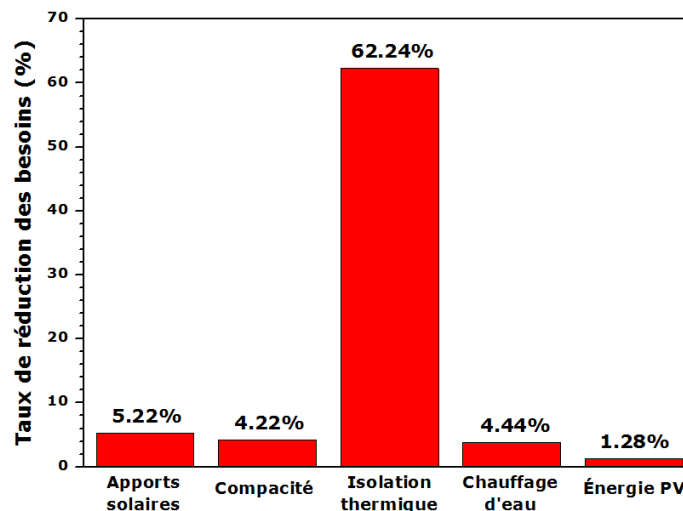


Figure III.7: Réduction des besoins énergétiques annuels suite à l'introduction d'un seul concept.

Selon ces résultats, un approvisionnement énergétique minimal nécessite un couplage et une mise au point de toutes les techniques possibles. La combinaison de ces techniques permet d'aboutir à une habitation

présentant des besoins en énergie de 11677.5717 kWh/an, équivalant à un taux de diminution de 77.40%. La figure III.8 prouve que l'intégration et le couplage de ces concepts apportent une forte baisse de la demande énergétique totale.

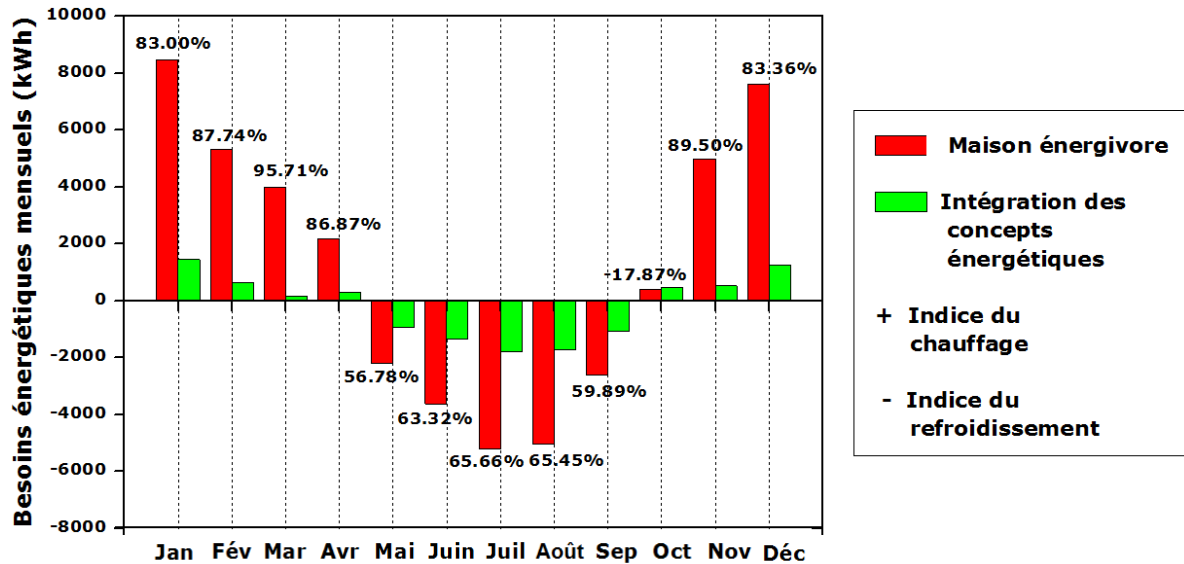


Figure III.8 : Besoins énergétiques mensuels, intégration et combinaison des concepts énergétiques.

On remarque que l'économie en énergie est plus significative du mois de novembre au mois d'avril, elle varie de 95.71 au 86.87 %. Ces mesures semblent donc plus rentables à la saison froide, la diminution des charges énergétiques en période de surchauffe varie entre 56.78% et 65.66%. La température mensuelle moyenne de l'air ambiant extérieur du mois d'octobre est de 24.98 °C, ce qui donne une température de confort équivalente à 25.54 °C. L'énergie requise due à l'enveloppe $Q_{Envelop}$ pour le chauffage est donc très faible, elle s'est estimée à 399.11 kWh. Cette quantité peut être facilement compensée par le gain de chaleur interne ($Q_{Occup} = 348.7500$ kWh, $Q_{Elc} = 111.04$ kWh). Cette situation engendre donc une surconsommation ajoutée aux besoins d'énergie dus à la production de l'eau chaude, à l'éclairage et à l'alimentation électrique et des appareils électroménagers. En intégrant une isolation thermique à l'édifice, la consommation énergétique mensuelle due à l'enveloppe $Q_{Envelop}$ sera changée. Les déperditions thermiques dues à l'enveloppe

diminueront mais la valeur absolue du terme $Q_{\text{Envelop}} - (Q_{\text{Occup}} + Q_{\text{Elc}})$ va accroître car la somme $Q_{\text{Occup}} + Q_{\text{Elc}}$ restera constante. La consommation globale Q_{Tot} va donc légèrement augmenter. Ce type de situation est généralement rencontré en mi-saison.

La répartition des besoins énergétiques par rapport aux besoins totaux sera complètement changée. Elle est représentée par la figure III.9.

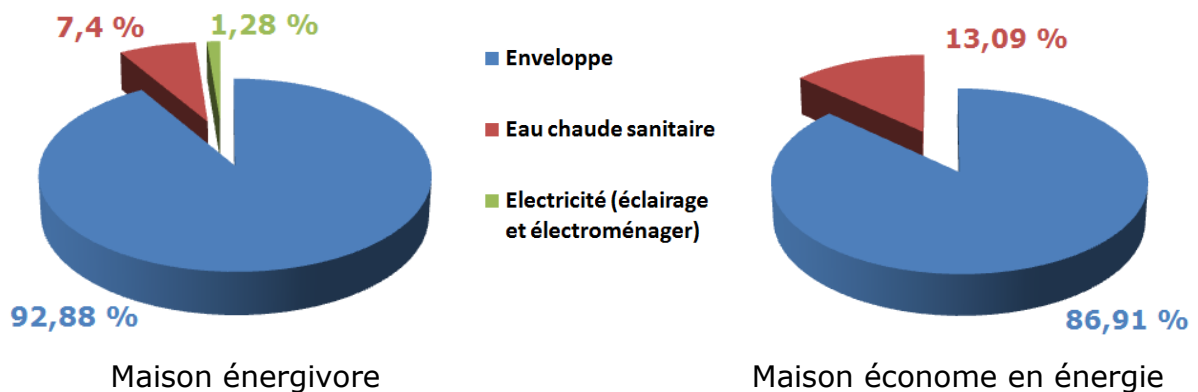


Figure III.9 : Répartition des besoins énergétiques, comparaison entre une maison énergivore et une maison économe en énergie.

III.5. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons utilisé une méthode d'évaluation précise qui sert à déterminer l'efficacité énergétique d'un modèle de logement. On s'est intéressé aux concepts passifs et actifs sous un climat semi aride "Ghardaïa".

En élevant les performances énergétiques des bâtiments, on pourra avoir une consommation énergétique réduite. Avant toute conception, il faudra d'abord résoudre les problèmes de perte de chaleur à travers l'enveloppe extérieure de l'édifice. Cet élément est le premier responsable des sources de déperditions thermiques. Les principales raisons sont dues à l'absence des concepts passifs et actifs.

L'intégration d'un seul concept est globalement insuffisante; à l'exception de l'isolation thermique, les autres techniques déployées apportent une faible baisse de la demande énergétique totale d'une habitation énergivore. Le couplage et la combinaison des concepts

architecturaux sont des solutions efficaces et fiables, sont une exigence pour diminuer sensiblement les charges énergétiques totales.

Faisant suite à ce constat, il est possible d'attribuer un label énergétique avant toute construction. Il suffit de fournir une fiche technique détaillée qui comprend tous les paramètres, les données et les scénarios d'occupation possibles. En intégrant les principaux concepts actifs tels que le photovoltaïque et le chauffage solaire de l'eau, et les concepts passifs comme le chauffage solaire passif "gains solaires gratuits", l'isolation thermique et la compacité, ce type de construction peut rejoindre les bâtiments ayant un label énergétique de type C.

Le choix des systèmes énergétiques intégrés ne devrait avoir lieu qu'une fois l'optimisation de l'enveloppe du bâtiment et le bon arrangement des espaces intérieurs soient terminés. Pour un meilleur avenir énergétique de nos bâtiments, nous devons imposer des critères d'utilisation rationnelle de l'énergie et affranchir une multitude de défis d'ordre technologique et stratégique.

Références

1. N. Saifi, Contribution à la conception des bâtiments à faible consommation d'énergie dans les zones arides, Doctorat en Sciences Spécialité Génie des Procédés, Université Kasdi Merbah, Ouargla, 2016.
2. M. Premrov, M. Žigart, V.Ž. Leskovar, Influence of the building shape on the energy performance of timber-glass buildings located in warm climatic regions, *Energy* Vol 149, 15 April 2018, Pages 496-504.
3. C. Antonopoulos, A. Trusty, V. Shandas, The role of building characteristics, demographics, and urban heat islands in shaping residential energy use, *City and Environment Interactions*, Vol 3, November 2019, 100021.
4. P.E. Camporeale, P.M. Moyano, Towards nearly Zero Energy Buildings: Shape optimization of typical housing typologies in Ibero-American temperate climate cities from a holistic perspective, *Solar Energy*, Vol 193, 15 November 2019, Pages 738-765.
5. M. Lotteau, P. Loubet, G. Sonnemann, An analysis to understand how the shape of a concrete residential building influences its embodied

- energy and embodied carbon, *Energy and Buildings* Vol 154, 1 November 2017, Pages 1-11.
6. A. AlAnzi, D. Seo, M. Krarti, Impact of building shape on thermal performance of office buildings in Kuwait, *Energy Conversion and Management* Vol 50, Issue 3, March 2009, Pages 822-828.
 7. F. Chi, Y. Wang, R. Wang, G. Li, C. Peng, An investigation of optimal window-to-wall ratio based on changes in building orientations for traditional dwellings, *Solar Energy* Vol 195, 1 January 2020, Pages 64-81.
 8. D. Mazzeo, K.J. Kontoleon, The role of inclination and orientation of different building roof typologies on indoor and outdoor environment thermal comfort in Italy and Greece, *Sustainable Cities and Society* Vol 60, September 2020, 102111.
 9. F.H. Aband, L. Byers, An investigation of the impact of building orientation on energy consumption in a domestic building using emerging BIM (Building Information Modelling), *Energy* Vol 97, 15 February 2016, Pages 517-527.
 10. A. Dutta, A. Samanta, S. Neogi, Influence of orientation and the impact of external window shading on building thermal performance in tropical climate, *Energy and Buildings* Vol 39, 15 March 2017, Pages 680-689.
 11. M. Hamdani, Choix de l'orientation et des matériaux de construction en vue d'améliorer les performances thermiques des bâtiments, Doctorat en Sciences Spécialité Physique Energétique, Université Abou-bakr belkaïd, Tlemcen, 2016.
 12. S. Belgherras, S.M.A. Bekkouche, T. Benouaz, N. Benamrane, Prospective analysis of the energy efficiency in a farm studio under Saharan weather conditions, *Energy and Buildings*, vol 145, 342-353, 2017.
 13. L. Chesné, Vers une nouvelle méthodologie de conception des bâtiments basée sur leurs performances bioclimatiques, Thèse de Doctorat, Centre de Thermique de Lyon, Institut National des Sciences Appliquées de Lyon, Ecole Doctorale MEGA, 2012.
 14. Ministre de l'habitat, Document technique Réglementaire, D.T.R.C 3- Document technique réglementaire, Décembre 1997 Alger.
 15. L. Belahcen, Amélioration des performances thermiques de l'enveloppe des bâtiments en vue de réduire le chauffage solaire, université d'Amar Telidji Laghouat, 2019.

16. S. Bendara, Stratégies de contrôle passif pour l'amélioration du confort thermo-Aéraulique des bâtiments multizones, thèse de Doctorat en Sciences Spécialité Physique énergétique, Université Abou-Bekr Belkaid, Tlemcen, Juin 2019.
17. H. Kadraoui, Diagnostic et solutions adaptées pour l'amélioration de l'efficacité énergétique d'une construction multizone énergivore, thèse de Doctorat en Sciences Spécialité Énergies Renouvelables, Université Abou-Bekr Belkaid, Tlemcen, 2019.
18. M.K. Cherier, L'utilisation passive de l'énergie solaire dans les habitats de Ghardaïa, Doctorat en Sciences Spécialité Énergies Renouvelables, Université Abou-Bekr Belkaid - Tlemcen, 2018.
19. S.M.A. Bekkouche, T. Benouaz, M. Hamdani, M.K. Cherier, M.R. Yaiche, N. Benamrane, Diagnosis and comprehensive quantification of energy needs for existing residential buildings under Sahara weather conditions, *Advances in Building Energy Research*, 1–15, 2016.
20. S.M.A. Bekkouche, T. Benouaz, M.K. Cherier, M. Hamdani, N. Benamrane, M.R. Yaiche, Thermal resistances of local building materials and their effect upon the interior temperatures case of a building located in Ghardaia region, *Construction and Building Materials*, vol 52, 59-70, 2014.
21. S.M.A. Bekkouche, T. Benouaz, M.K. Cherier, M. Hamdani, M.R. Yaiche, N. Benamrane, Influence of the compactness index to increase the internal temperature of a building in Saharan climate, *Energy and Buildings*, vol 66, 678–687, 2013.

Chapitre IV

Intégration des Mesures Actives & Système PV et Chauffe-eau Solaire

Chapitre IV :

Intégration des Mesures Actives & Système PV et Chauffe-eau Solaire

IV.1. Introduction

Aujourd'hui, les réserves des ressources en énergies fossiles ne cessent de diminuer. En plus, les prix fluctuent énormément en fonction de la conjoncture. L'électricité et l'eau chaude sanitaire sont des exigences essentielles pour un niveau de vie et un confort acceptable.

La production de l'énergie électrique et de l'eau chaude se font principalement à base d'énergies fossiles telles que le pétrole, le charbon ou le gaz naturel. Ces ressources permettent d'avoir de faibles coûts de production mais conduisent à un dégagement massif de gaz polluant et de gaz à effet de serre.

Par opposition, la production de l'énergie solaire photovoltaïque contribue à la réduction des rejets polluants, des émissions de gaz à effet de serre, et à la préservation de nos ressources naturelles. Face à l'évolution technologique des systèmes photovoltaïques, il faut mettre en avant une adéquation entre le potentiel de production d'énergie photovoltaïque et la consommation électrique typique d'un logement [1].

La généralisation des chauffe-eaux solaires conduit à des solutions économiques et durables. Cependant, en comparant avec les systèmes utilisant une source de chaleur classique telle que le gaz ou l'électricité, le taux d'utilisation des chauffe-eaux solaires est encore faible. Le gaz ou l'électricité reste la principale source de chaleur pour le chauffage de l'eau domestique. Les chauffe-eaux solaires peuvent économiser jusqu'à 75% de la facture d'eau chaude sanitaire [2].

Il a été montré au chapitre précédent que l'intégration combinée des différents concepts a permis d'atteindre un taux d'économie de 77.40%. Nous rappelons que l'intégration des principaux concepts tels que le photovoltaïque (charge électrique journalière de 1816 Wh/jour), le chauffage solaire de l'eau (50 litres par jour à 50 °C pour les 5

occupants), le chauffage solaire passif en utilisant les gains solaires gratuits, l'isolation thermique et la compacité, conduira à avoir une habitation ayant un label énergétique de type C. La consommation énergétique annuelle correspond à une valeur située entre 91 et 150 kWh/m²/an (figure IV.1).

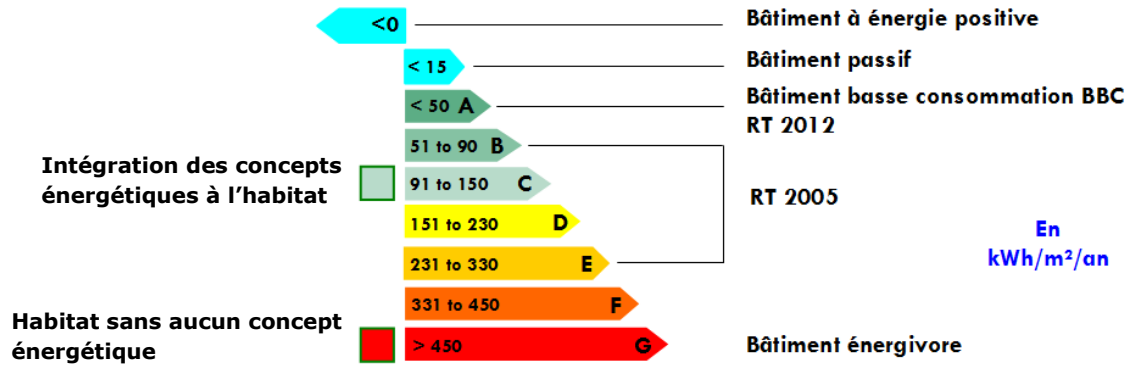


Figure IV.1 : Système d'étiquettes énergétiques pour les bâtiments.

Faisant face à ces données, d'autres démarches vont être proposées pour diminuer plus les besoins d'énergie et atteindre par la suite une meilleure efficacité énergétique. Les travaux à entreprendre peuvent trouver une ampleur dans certaines problématiques futures. La première démarche consiste à concevoir et proposer un système photovoltaïque autonome muni d'un système intelligent avec une charge électrique qui dépasse celle retenue au troisième chapitre. Le fait d'insérer l'intelligence dans la gestion électrique de la consommation d'énergie, permet de maintenir une consommation optimale (sans abus et en respectant un comportement exemplaire de l'individu) et de compenser les besoins énergétiques requis dus aux déperditions thermiques de l'enveloppe et au chauffage de l'eau. La deuxième partie est consacrée à une expérimentation d'un capteur solaire à tube sous vide en utilisant la méthodologie de surface de réponse. L'objectif est d'optimiser les paramètres de fonctionnement avec lesquelles on obtient une meilleure précision avec un minimum d'essais. On aura donc un maximum de performance avec le minimum d'expériences.

IV.2. Éléments de conception, dimensionnement et optimisation du système photovoltaïque

Un bon dimensionnement est une étape indispensable pour optimiser des systèmes à énergies renouvelables et ce, du fait de leur nature intermittente. A cet effet, ces travaux se font en fonction de plusieurs types de modules PV, leurs prix et les batteries de stockage, le prix et leurs capacités. L'objectif est de maintenir un niveau de fiabilité élevé avec un coût minimal grâce à un dimensionnement optimal des systèmes photovoltaïques autonomes.

IV.2.1. Réalisation du système intelligent

La première démarche s'est articulée sur un circuit électronique réalisé pour la gestion de l'énergie électrique dédiée à diverses utilisations, notamment l'éclairage et l'alimentation en électricité de certains équipements électroménagers (lampes, climatiseur et ventilateur). Les figures IV.2 et IV.3 donnent une vue d'ensemble des composants interconnectés par un circuit de pilotage.

Techniquement, ce système intelligent intègre des fonctions de détection, de mesure, de contrôle et de gestion de l'utilisation d'énergie électrique, il se compose en trois parties:

La première est un instrument intelligent basé sur une carte Arduino de type Uno. Il s'agit d'une carte électronique développée et composée d'un circuit électronique open source et d'une plate-forme utilisée pour les projets d'électronique. Il consiste à la fois en une carte de circuit physique programmable (souvent appelée microcontrôleur) et un logiciel, ou IDE (Environnement de Développement Intégré) exécuté sur un ordinateur, qui permet l'écriture et le téléchargement du code informatique sur la carte physique. La deuxième partie comprend des dispositifs de détection constitués de divers composants, tels qu'une photorésistance de type LDR, un capteur de température de type DHT22 et un capteur de mouvement de type PIR, destinés à détecter respectivement la lumière, la température et le mouvement.

La troisième partie est un dispositif de commande basé sur le relais électromécanique de quatre canaux. Ces derniers ont été utilisés pour une isolation électrique entre une faible puissance représentée par la carte Arduino et divers capteurs et la puissance élevée représentée par trois appareils électriques (les lampes, le ventilateur et le climatiseur).



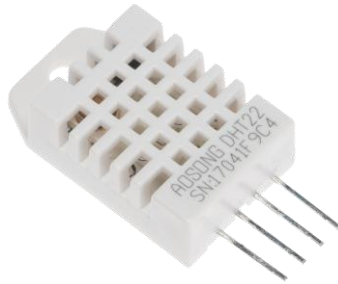
Carte Arduino de type Uno



Capteur de lumière "LDR"



Capteur de mouvement "PIR"

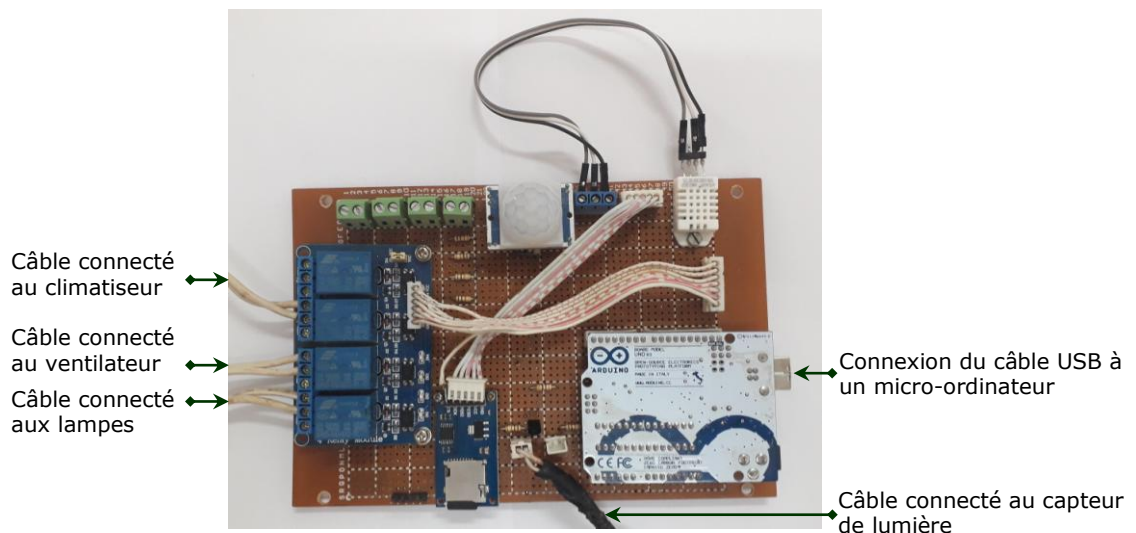


Capteur de température DHT22



Relais électromécanique à quatre canaux

Figure IV.2 : Composants du système intelligent.



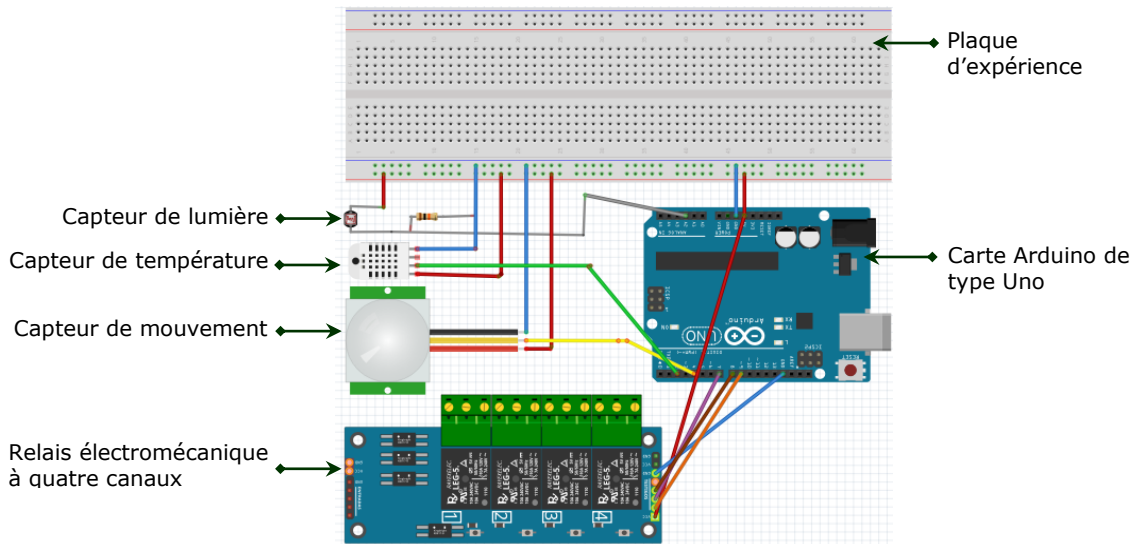


Figure IV.3 : Image descriptive du système réalisé.

IV.2.2. Description du code intégré à la carte Arduino

Le langage Arduino est très proche du C et du C++. L'Arduino utilise le compilateur "avr-gcc" et "avrdude" pour téléverser les programmes. Le code réalisé est structuré de telle sorte qu'il puisse d'abord lire les données des différents capteurs puis commander la charge à alimenter (lampes, climatiseur et ventilateur). Dans ce code se trouvent deux fonctions. Les fonctions sont en fait des portions de code. La fonction "Setup()" est une fonction d'initialisation, elle est appelée une seule fois lorsque le programme débute. La fonction "loop()" sert à écrire le contenu du programme. C'est une fonction qui est appelée en permanence, c'est-à-dire qu'elle est exécutée plusieurs fois. La compilation et le téléversement du programme suscite certaines options qui permettront d'élever la quantité d'informations et de notifications affichées à l'écran. On peut reproduire le même processus en compilant le programme par le lancement de la commande "avr-gcc" et l'exécution du compilateur "avrdude" avec les bonnes options pour le téléversement [3].

L'interface du code intégré à la carte Arduino est représentée sur la figure IV.4. Les fonctions de commande assurent la lecture des différentes données relatives aux capteurs: de lumière, de température et de mouvement.

```

smart_system_code
#include <DHT.h> // Include DHT library
#define DHTPIN 2 // Digital pin connected to the temperature sensor
#define LightSensorPin A2 // Analog pin connected to the light sensor
#define MovementSensorPin 4 // Digital pin connected to the movement sensor
#define relay1_LightSensor 9 // Digital pin connected to the relay 1
#define relay2_Fan 7 // Digital pin connected to the relay 2
#define relay3_AirConditioner 8 // Digital pin connected to the relay 3
#define DHTTYPE DHT22 // Define the type of DHT
DHT dht(DHTPIN, DHTTYPE); // Declare the dht for reading its value
int x; // Declare the variable x
float y = 0.; // Declare the variable y
float T = 0; // Declare the variable T

void setup()
{
  Serial.begin(9600); // Set serial communication
  dht.begin();
  pinMode(MovementSensorPin,INPUT); // Set the movement sensor pin as an input mode
  pinMode(relay1_LightSensor,OUTPUT); // Set the pin of relay 1 as an output mode
  pinMode(relay2_Fan,OUTPUT); // Set the pin of relay 2 as an output mode
  pinMode(relay3_AirConditioner,OUTPUT); // Set the pin of relay 3 as an output mode
}

void loop()
{
  x=digitalRead(MovementSensorPin); // Read movement sensor value
  y = (analogRead(LightSensorPin)*5.)/1023; // Read light sensor value
  T = dht.readTemperature(); // Read temperature sensor value
  if ((x == 1) && (y < 1))
  {
    Serial.print("There is a person in the studio"); // Print a message data to serial display
    //in the case of this condition is achieved
    Serial.print(' ');
    Serial.print("LightSensValue = "); // Print light sensor value to serial display
    Serial.print(y);
    Serial.print(' ');
    digitalWrite(relay1_LightSensor, LOW); // Set the relay 1 on (the relay fonctionne inversely)
    Serial.print(" ( the Lamps are on ) "); // Print a message data to serial display
    //in the case of this condition is achieved
    Serial.print(' ');
  }
  else if ((x == 1) && (y >= 1))
  {
    Serial.print("There is a person in the studio"); // Print a message data to serial display
    //in the case of this condition is achieved
    Serial.print(' ');
    Serial.print("LightSensValue = "); // Print light sensor value to serial display
    Serial.print(y);
    Serial.print(' ');
    digitalWrite(relay1_LightSensor, HIGH); // Set the relay 1 off
    Serial.print(" ( the Lamps are off ) "); // Print a message data to serial display
    //in the case of this condition is achieved
    Serial.print(' ');
  }
  else
  {
    Serial.print("There is no one in the studio"); // Print a message data to serial display
    //in the case of this condition is achieved
    Serial.print(' ');
    Serial.print("LightSensValue = "); // Print light sensor value to serial display
    Serial.print(y);
    Serial.print(' ');
    digitalWrite(relay1_LightSensor, HIGH); // Set the relay 1 off
    Serial.print(" ( the Lamps are off ) "); // Print a message data to serial display
    //in the case of this condition is achieved
    Serial.print(' ');
  }
  Serial.print("Temp = "); // Print temperature sensor value to serial display
  Serial.print(T);
  Serial.print(" °C");
  Serial.print(' ');
  if ((x == 1) && (T < 28))
  {
    digitalWrite(relay2_Fan,HIGH); // Set the relay 2 off
    digitalWrite(relay3_AirConditioner,HIGH); // Set the relay 3 off
    Serial.println(" ( the Fan is off and the Air Conditioner is off ) "); // Print a message data to serial display
    //in the case of this condition is achieved
  }
  else if ((x == 1) && (T >= 28) && (T < 33))
  {
    digitalWrite(relay2_Fan,LOW); // Set the relay 2 on
    digitalWrite(relay3_AirConditioner,HIGH); // Set the relay 3 off
    Serial.println(" ( the Fan is on and the Air Conditioner is off ) "); // Print a message data to serial display
    //in the case of this condition is achieved
  }
  else if ((x == 1) && (T >= 33))
  {
    digitalWrite(relay2_Fan,HIGH); // Set the relay 2 off
    digitalWrite(relay3_AirConditioner,LOW); // Set the relay 3 on
    Serial.println(" ( the Fan is off and the Air Conditioner is on ) "); // Print a message data to serial display
    //in the case of this condition is achieved
  }
  else
  {
    digitalWrite(relay2_Fan,HIGH); // Set the relay 2 off
    digitalWrite(relay3_AirConditioner,HIGH); // Set the relay 3 off
    Serial.println(" ( the Fan is off and the Air Conditioner is off ) "); // Print a message data to serial display
    //in the case of this condition is achieved
  }
  delay(60000); // Wait for a 60 seconds
}

```

Téléversement terminé

Figure IV.4 : Interface du code intégré à la carte Arduino.

IV.2.3. Intégration du "Système intelligent" au système autonome

Le schéma descriptif de notre système tout entier est donné par la figure IV.5. La gestion et la commande de la charge à alimenter (lampes, climatiseur et ventilateur) se font conformément à ce diagramme.

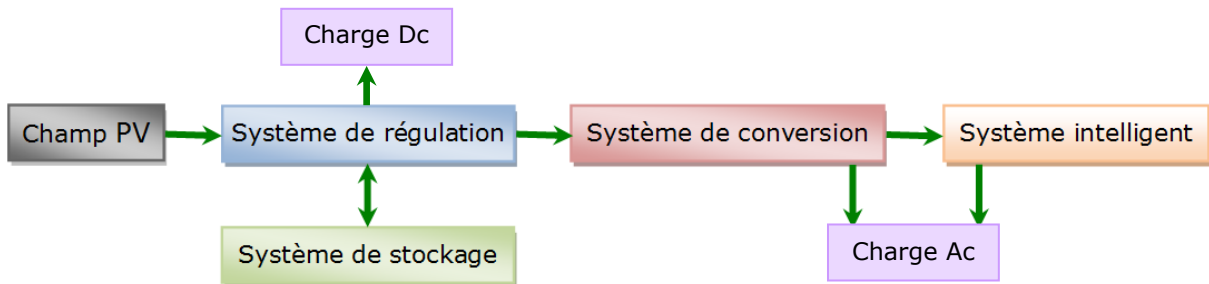


Figure IV.5 : Intégration du système intelligent au Système PV autonome.

Le système photovoltaïque autonome associé au système intelligent comprend principalement:

- Un champ photovoltaïque,
- Un système de stockage électrique (batteries),
- Un système de régulation (régulateur de charge),
- Un système de conversion (onduleur) et
- Un système intelligent.

Le champ photovoltaïque est constitué de modules photovoltaïques interconnectés entre eux en série et en parallèle. Ils transforment la lumière du soleil en courant électrique continu "DC".

Le système de stockage est un élément essentiel dans un système photovoltaïque autonome. Son rôle est de stocker l'énergie photovoltaïque produite pendant la journée pour l'utiliser la nuit et les jours en absence d'ensoleillement.

Le système de régulation (régulateur de charge) est associé au générateur, il a pour rôle de contrôler la charge de la batterie et de limiter sa décharge. Son fonctionnement est primordial car il a un impact direct sur la durée de vie des batteries. Le système intelligent constitue une interface entre les composants du système photovoltaïque et la charge

(lampes, climatiseur et ventilateur). Celui-ci nous permet de contrôler intelligemment la consommation. Une part (le surplus de la précédente charge) de l'énergie photovoltaïque produite sert à compenser les besoins énergétiques dus aux déperditions thermiques de l'enveloppe et au chauffage de l'eau.

IV.2.4. Méthode de dimensionnement

L'étude de dimensionnement est toujours confrontée à deux critères essentiels qui sont le gisement solaire et la demande en énergie [4]. Le dimensionnement d'un générateur photovoltaïque a pour objectif la détermination de la puissance crête du champ photovoltaïque, la capacité des batteries associées à partir des données d'ensoleillement, et les besoins électriques de l'utilisateur. Les différents éléments doivent garantir l'approvisionnement en énergie électrique tout au long de l'année ou éventuellement sur une période déterminée [5].

Le dimensionnement du système tout entier s'articule sur la méthodologie suivante:

a. Optimisation du nombre de modules photovoltaïques

Pour calculer le nombre de panneaux solaires photovoltaïques, nous devons estimer la durée d'insolation dans le lieu d'installation. Dans cette étude, nous avons procédé au dimensionnement et à l'optimisation du nombre de modules photovoltaïques. Cette voie doit se faire en fonction des données du site (Ghardaïa), plus précisément le nombre d'heures d'ensoleillement par jour sur une surface inclinée optimale. Pour effectuer les calculs, nous retenons comme exemple une valeur moyenne de 6.5 heures par jour.

La taille du générateur photovoltaïque et le nombre de modules solaires peuvent être calculés par les équations suivantes [6]:

$$P_{\text{Générateur-PV}} = \frac{E_{\text{Charge}}}{D_{\text{Ins}}} \quad (\text{IV.1})$$

$$N_{\text{Modules-PV}} = \frac{P_{\text{Générateur-PV}}}{P_{\text{Module-PV}}} \quad (\text{IV.2})$$

$P_{\text{Générateur-PV}}$: puissance crête du générateur photovoltaïque (W_c).

E_{Charge} : consommation d'énergie quotidienne (Wh).

D_{Ins} : durée d'insolation ou le nombre d'heures d'ensoleillement (h).

Le nombre de modules en série s'exprime sous la forme suivante :

$$N_{\text{Modules-PV_série}} = \frac{U_{\text{Tension_système}}}{U_n} \quad (IV.3)$$

$U_{\text{Tension_système}}$: tension du système photovoltaïque (V). Sa valeur retenue sera déterminée en fonction de la puissance crête du générateur. Elle sera fixée à :

- 12 V si la puissance crête du générateur est inférieure à 500 Wc.
- 24 V si la puissance crête du générateur est comprise entre 500 et 1200 Wc.
- 48 V si la puissance crête du générateur est supérieure à 1200 Wc.

U_n : tension nominale du module (V).

Le nombre de modules en parallèle se calcule par l'équation IV.4 :

$$N_{\text{Modules-PV_parallèle}} = \frac{N_{\text{Modules-PV}}}{N_{\text{Modules-PV_série}}} \quad (IV.4)$$

Le coût du générateur photovoltaïque varie en fonction de la capacité du champ photovoltaïque. Il est déterminé en connaissant le nombre de modules photovoltaïques et le coût de chacun.

L'algorithme d'optimisation du nombre de modules en fonction de leurs technologies de fabrication et de leurs prix est décrit par la figure IV.6.

b. Optimisation du nombre de batteries

Pour déterminer le nombre de batteries idéal, on se base sur la capacité du stockage (Ah) des batteries calculée à l'aide de l'équation suivante [6]:

$$C_{\text{Stockage}} = \frac{E_{\text{Charge}} \cdot n_{\text{Jours_autonomie}}}{P_{\text{Profondeur_décharge}} \cdot U_{\text{Tension_système}}} \quad (IV.5)$$

$n_{\text{Jours_autonomie}}$: nombre de jours d'autonomie.

$P_{\text{Profondeur_décharge}}$: profondeur de décharge des batteries, par définition la fraction ou le pourcentage de la capacité qui a été retirée de la batterie complètement chargée.

$P_{\text{Profondeur_décharge}} = 0.8$ pour les batteries solaires.

$P_{\text{Profondeur_décharge}} = 0.6$ pour les batteries industrielles.

$P_{\text{Profondeur_décharge}} = 0.5$ pour les batteries de voitures.

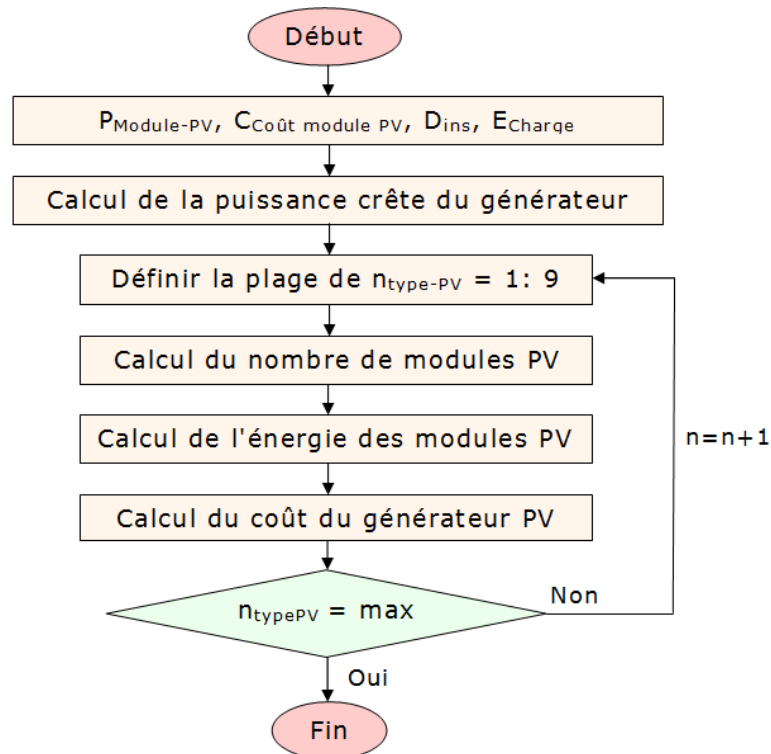


Figure IV.6 : Algorithme d'optimisation du nombre de modules photovoltaïques.

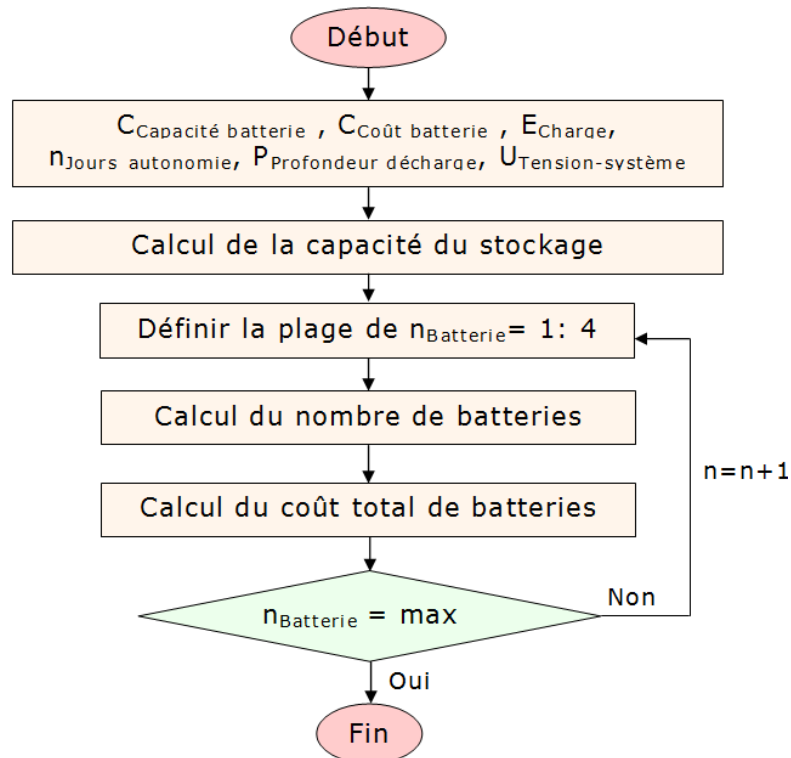


Figure IV.7 : Algorithme d'optimisation de la banque de batteries.

Le nombre de batteries se calcule conformément à l'équation suivante:

$$N_{\text{Batteries}} = \frac{C_{\text{Stockage}}}{C_{\text{Capacité_batterie}}} \quad (\text{IV.6})$$

Le coût du groupe de batteries est basé sur la taille réelle des batteries.

L'algorithme d'optimisation du nombre de batteries est donné par la figure IV.7.

c. Capacité du régulateur de charge

Le régulateur de charge est le cœur du système photovoltaïque. Il assure la surveillance et la protection des batteries. Ce contrôleur de charge assure donc deux fonctions principales: protéger les batteries contre les surcharges et les décharges profondes et optimiser le transfert de l'énergie électrique du générateur photovoltaïque à la charge. Pour choisir la capacité du contrôleur de charge, nous devons connaître le courant maximal produit par les modules photovoltaïques [6]:

$$I_{\text{Régulateur}} = \frac{P_{\text{Générateur-PV}}}{U_{\text{Tension_système}}} \quad (\text{IV.7})$$

d. Capacité de l'onduleur

Un onduleur est un dispositif électronique qui convertit un courant continu en un courant alternatif sinusoïdal. Il reçoit le courant produit par le générateur photovoltaïque pour le convertir en un courant alternatif. La capacité de l'onduleur a donc été déterminée par cette formule [6]:

$$P_{\text{Onduleur}} = 1.16 P_{\text{Générateur-PV}} \quad (\text{IV.8})$$

Le facteur 1.16 représente la somme des rendements de tous les composants du système PV (régulateur de charge, batteries et onduleur).

IV.3. Coût du système photovoltaïque

Le coût total des composants du système photovoltaïque dépend de la capacité du générateur photovoltaïque, la capacité des batteries, la capacité de l'onduleur, la capacité du contrôleur de charge et d'autres composants utiles.

a. Régulateur de charge et onduleur

Le coût du régulateur de charge se calcule par l'équation IV.9 :

$$C_{\text{Coût-régulateur}} = \gamma_{\text{Coût-A}} I_{\text{Régulateur}} \quad (\text{IV.9})$$

$\gamma_{\text{Coût-A}}$ indiquent le coût unitaire du courant du régulateur de charge.

De même, le coût de l'onduleur est donné par la formule suivante :

$$C_{\text{Coût-onduleur}} = \delta_{\text{Coût-w}} P_{\text{Onduleur}} \quad (\text{IV.10})$$

b. Coût de la structure et des câbles électriques

Le coût de la structure du générateur photovoltaïque et celui des câbles électriques reliant les composants du système photovoltaïque représentent environ 20% du coût total de ces composants [6].

c. Coût du système intelligent

Le coût du système intelligent (équation IV.11) sera calculé en opérant la somme des coûts correspondants aux différents composants: la carte Arduino, le capteur de lumière, le capteur de mouvement, le capteur de température et le relais électromécanique à quatre canaux.

$$C_{\text{Coût_système_intelligent}} = C_{\text{Coût_Arduino}} + C_{\text{Coût_Cap}_{\text{lumière}}} + C_{\text{Coût_Cap}_{\text{mouvement}}} + C_{\text{Coût_Cap}_{\text{température}}} + C_{\text{Relais}} \quad (\text{IV.11})$$

IV.4. Mise en marche et test du système intelligent

L'application implémentée au système sert à piloter la consommation énergétique. Pour vérifier son fonctionnement concrètement, nous avons choisi une période très chaude avec des conditions climatiques globalement similaires. Le mode d'occupation, plus précisément la durée d'occupation des individus et le nombre d'occupants, est dans l'ensemble identique le long de cette période.

La première phase, s'étend du 17 au 31 août 2018, consiste à calculer la consommation électrique des lampes, du climatiseur et du ventilateur en utilisant l'électricité du réseau. Dans cette phase, nous n'avons pas tenu compte du système intelligent pour calculer la consommation. Nous

utilisons les équipements électroménagers manuellement et selon la sensation du confort.

Néanmoins, le système intelligent n'a été intégré qu'au cours de la deuxième phase, l'énergie produite a été déterminée en respectant les mêmes scénarios imposés. La mise en marche de ces équipements électroménagers s'est effectuée comme suit :

Les lampes : vont être allumées pour une tension inférieure à 1 volt, une petite expérience a montré qu'au delà de cette valeur le flux lumineux est largement suffisant. Elles seront aussi allumées par détection physique de l'être humain.

Le climatiseur: sera allumé lorsque la température environnante est de 33 °C. Il sera aussi allumé par détection physique de l'être humain.

Le ventilateur: sa mise en marche sera effective si la température environnante varie de 28 au 33 °C. Il sera aussi allumé par détection physique de l'être humain.

Le relevé des énergies consommées a été effectué chaque 24 heures en utilisant un compteur de consommation électrique. Le tableau IV.1 synthétise les valeurs correspondantes.

L'interface indiquée sur la figure IV.8 attribue en détail le fonctionnement du système intelligent. Elle nous donne en temps réel (chaque minute) une description du scénario opté par l'application conçue.

Les résultats obtenus ont montré que la consommation électrique globale a diminué de 143.692 à 105.708 kWh durant respectivement ces deux périodes, sachant que les conditions climatiques extérieures ont été presque similaires. Cette réduction en énergie correspond à une économie de l'ordre de 26.43% pour ce cas.

Tableau IV.1 : Relevé des énergies consommées d'une charge composée de lampes, d'un climatiseur et d'un ventilateur.

Première période		Deuxième période, intégration du système intelligent	
Numéro du jour Du 17 au 31 août	Energie consommée en Wh	Numéro du jour Du 1 ^{er} au 15 septembre	Energie consommée en Wh
17	9 318	01	2 104
18	12 202	02	2 391
19	12 218	03	7 792
20	12 348	04	10 072
21	9 059	05	9 296
22	11 190	06	10 023
23	8 079	07	11 515
24	9 241	08	8 798
25	9 018	09	8 000
26	2 216	10	9 705
27	6 426	11	9 268
28	5 798	12	987
29	13 400	13	10 517
30	10 924	14	1 445
31	12 255	15	3 795
Total	143 692	Total	105 708

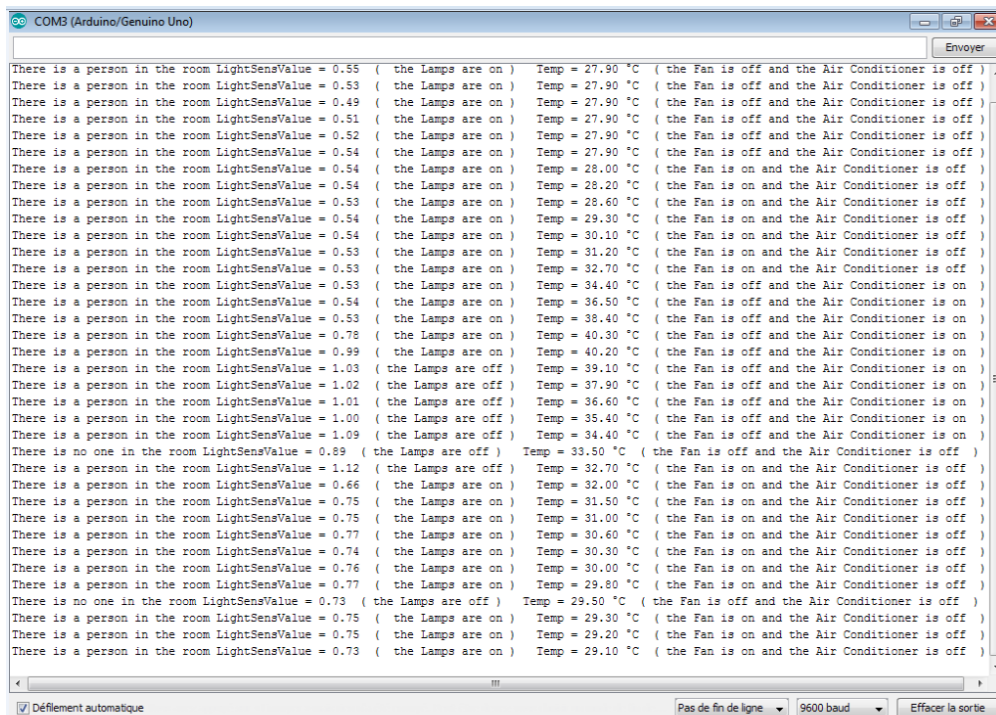


Figure IV.8 : Fonctionnement et description du scénario d'occupation issu de l'application conçue (exemple indicatif).

IV.5. Performance du système photovoltaïque

Cette section est consacrée à l'évaluation des performances du système photovoltaïque. On s'intéresse d'abord à l'énergie photovoltaïque produite qui s'identifie comme suit:

$$E_{\text{Générateur-PV}}(i) = A_{\text{Générateur-PV}} \eta_{\text{Générateur-PV}}(i) E_{\text{Soleil}}(i) \quad (\text{IV.12})$$

i : indique le jour.

$A_{\text{Générateur-PV}}$: surface totale du générateur photovoltaïque (m^2).

E_{Soleil} : énergie solaire reçue par unité de surface (Wh/m^2).

$\eta_{\text{Générateur-PV}}$: rendement du générateur photovoltaïque calculé par l'équation suivante [7]:

$$\eta_{\text{Générateur-PV}}(i) = \eta_{\text{Générateur-PV_réf}} (1 - \beta(T_{\text{cell}}(i) - 25)) \quad (\text{IV.13})$$

$$\eta_{\text{Générateur-PV_réf}} = \frac{P_{\text{Générateur-PV}}}{1000 A_{\text{Générateur-PV}}} \quad (\text{IV.14})$$

β : coefficient de température négative de (de la puissance) la cellule donnée par le fabricant, il varie entre -0.42% et -0.35%.

T_{cell} : température de la cellule calculée pour chaque jour, exprimée par la formule suivante [7]:

$$T_{\text{cell}}(i) = T_{\text{Ambiante}}(i) (1 + 1.25 G(i)) \quad (\text{IV.15})$$

$T_{\text{Ambiante}}(i)$: température ambiante journalière moyenne ($^{\circ}\text{C}$).

$G(i)$: éclairement solaire moyen par jour (W/m^2).

L'énergie stockée dans les batteries peut être estimée selon la période (charge ou décharge) suivant les équations ci-dessous [7]:

$$E_{\text{Batteries}}(i)_{\text{Charge}} = E_{\text{Batteries}}(i-1) (1 - \eta_{\text{batt_self_disc}}) + (E_{\text{Générateur-PV}}(i) - E_{\text{Charge}}(i)) \eta_{\text{Batteries}} \quad (\text{IV.16})$$

$$E_{\text{Batteries}}(i)_{\text{Décharge}} = E_{\text{Batteries}}(i-1) (1 - \eta_{\text{batt_self_disc}}) + (E_{\text{Générateur-PV}}(i) - E_{\text{Charge}}(i)) \quad (\text{IV.17})$$

$\eta_{\text{Batteries}}$: rendement de la batterie.

$\eta_{\text{batt_self_disc}}$: taux quotidien d'autodécharge de la batterie solaire.

L'énergie stockée dans les batteries est soumise à la condition [7]:

$$E_{\text{Batteries_min}} \leq E_{\text{Batteries}}(i) \leq E_{\text{Batteries_max}} \quad (\text{IV.18})$$

$E_{\text{Batteries_min}}$: niveau d'énergie minimal (Wh).

$E_{\text{Batteries_max}}$: niveau d'énergie maximal (Wh).

IV.6. Dimensionnement du système PV et des batteries

L'objectif vise à optimiser le nombre de modules constituant le générateur photovoltaïque et le nombre de batteries. Sur la base des équations précédentes, il est possible de dresser deux tableaux, l'un (tableau IV.2) concerne l'optimisation du coût des batteries de stockage et l'autre (tableau IV.3) concerne les modules photovoltaïques. L'installation s'est basée sur une charge de 13.4 kWh définie (choisie) comme étant la consommation maximale durant la période d'étude. L'enchaînement, le montage et la connexion des modules se font conformément et s'accordent aux équations précédentes.

Tableau IV.2 : Optimisation du coût, enchaînement et schéma de connexion des batteries solaires.

Capacité de la batterie (Ah)	Coût de la batterie (DA)	Nombre obtenu de batteries		Coût de la banque de batteries (DA)	Connexion des batteries
		Par calcul	à installer		
60	26 700	14	16	427200	4 rangers de 4 batteries en série
110	44 550	8	8	356 400	2 rangers de 4 batteries en série
165	73 800	6	8	590400	2 rangers de 4 batteries en série
220	90 150		4	360 600	4 batteries en série

Pour notre application, les résultats montrent que le système composé de 12 modules solaires polycristallins est le plus rentable parmi les 9 types de modules considérés. Ce sont des modules de 240 Wc qui s'élevaient à 25 200 DA pour un seul. L'installation va comprendre aussi 8 batteries solaires (44 550 DA par batterie) avec une capacité de 110 Ah. Le montage de ces éléments est indiqué sur les deux tableaux. Il est à signaler que si le prix unitaire est le même; par exemple le cas de la deuxième et la troisième ligne du tableau IV.3, nous retenons le cas dont la surface de captation du champ PV est la moins faible.

Tableau IV.3 : Optimisation du coût, enchaînement et schéma de connexion des modules photovoltaïques.

Type de modules	Puissance crête du module (Wc)	Coût du module (DA)	Nombre de modules PV par calcul	Connexion des modules PV	Nombre de modules PV à installer	Energie produite par les modules (Wh)	Coûts obtenus (DA)		Surface de captation du champ PV (m ²)
							des modules PV	Par Wh	
Monocristallin	95	10 500	26	7 rangers de 4 modules en série	28	17290	294 000	17.00	17.2536
	100	11 100	24	6 rangers de 4 modules en série	24	15600	266 400	17.07	15.9264
	200	22 200	12	3 rangers de 4 modules en série	12	15600	266 400	17.07	15.3197
Polycristallin	70	08 250	36	9 rangers de 4 modules en série	36	16380	297 000	18.13	19.1059
	145	15 300	18	5 rangers de 4 modules en série	20	18850	306 000	16.23	17.9784
	235	24 750	12		12	18330	297 000	16.20	19.5216
	240	25 200	10	3 rangers de 4 modules en série	12	18720	302 400	16.15	16.2680
	280	29 550	10		12	21840	354 600	16.24	19.4030
	285	30 000	10		12	22230	360 000	16.19	19.4030

Par calcul, de l'équation IV.7, le courant du régulateur choisi doit dépasser 60 A. C'est-à-dire la capacité du régulateur de charge doit être supérieure à la capacité déterminée, c'est pourquoi nous avons choisi un régulateur dont sa capacité est de 70 A. La capacité de l'onduleur requise pour la présente étude est retenue à une valeur de 2880 Wc. Nous devons donc sélectionner un onduleur de capacité supérieure à cette valeur; onduleur de 3 kVA de capacité par exemple.

IV.7. Stockage d'énergie par les batteries solaires

Les batteries solaires stockent l'énergie produite par les panneaux photovoltaïques en toutes circonstances, jour ou nuit, ciel dégagé ou couvert. Après avoir connu le nombre optimal de modules photovoltaïques et de batteries et après la sélection d'un régulateur de charge et d'un onduleur approprié, nous nous intéressons à déterminer l'énergie électrique calculée dans la banque de batteries. Les résultats affichés (tableau IV.4) correspondent à deux cas, sans et avec système intelligent.

Tableau IV.4 : Calcul des énergies stockées dans la banque de batteries.

Première période		Deuxième période, intégration du système intelligent	
Numéro du jour Du 17 au 31 août	Energie stockée en Wh	Numéro du jour Du 1 ^{er} au 15 septembre	Energie stockée en Wh
17	12113.5	01	18612.3
18	8964.9	02	18921.0
19	8858.8	03	13726.5
20	8541.7	04	11471.6
21	12212.0	05	12349.3
22	9638.8	06	11654.3
23	12856.0	07	9932.7
24	11561.6	08	12223.7
25	11568.5	09	12932.0
26	18543.1	10	11321.9
27	14436.1	11	11888.6
28	15373.4	12	19936.0
29	8051.0	13	10474.4
30	9980.7	14	19377.8
31	8561.6	15	17164.4
Total	171261.7	Total	211986.5

Les valeurs enregistrées ont montré que l'énergie électrique globale stockée dans les batteries solaires est passée de 171.2617 au 211.9865 kWh par période. Cette augmentation en énergie correspond à un gain de l'ordre de 23.78 %. Cela signifie que le système intelligent contribue à la rationalisation de l'énergie.

IV.8. Application à une habitation

L'idée proposée dans cette partie s'est articulée sur l'exploitation d'un système photovoltaïque de 2880 Wc pour assurer une production de pas moins de 13.4 kWh. On verra dans quelle mesure l'énergie produite par ce système pourra couvrir les besoins énergétiques restants après l'intégration des concepts passifs et actifs étudiés au chapitre précédent. Les besoins dus à l'éclairage et à l'électroménager, qui se sont fixés à 1.816 kWh seront alimentés par le champ photovoltaïque de 2880 Wc.

L'étude s'est basée sur l'indice de clarté journalier de l'année 2017 au site de Ghardaïa. Ce paramètre mesuré expérimentalement a été déduit en mesurant l'éclairement solaire horizontal correspondant au site. Notre démarche s'est reposée principalement sur l'énergie produite par le système photovoltaïque. Cette situation nous amène à calculer l'irradiation journalière incidente sur un capteur à latitude de lieu (32°). Donc, nous multiplions l'irradiation journalière incidente sur un plan incliné à 32° pour un ciel totalement clair (obtenu par le modèle de Perrin) par l'indice de clarté pour avoir les valeurs approximatives de l'irradiation journalière incidente sur le champ photovoltaïque. Cette méthode nous a permis de déterminer l'énergie produite journalière et par conséquent mensuelle d'origine photovoltaïque. L'exécution des formules données par la combinaison d'équations IV.12, IV.13, IV.14 et IV.15 nécessite aussi une connaissance de l'éclairement moyen journalier et la température ambiante au cours de toute l'année. Les valeurs mensuelles obtenues de l'énergie produite sont données par le tableau IV.5. Selon les résultats et conformément aux données de l'année 2017, notre système photovoltaïque peut délivrer une énergie de l'ordre de 8281.1 kWh par an.

Tableau IV.5 : Valeurs mensuelles calculées de l'énergie PV produite.

Mois	Jan	Fév	Mar	Avr	Mai	Juin	Juil	Aout	Sep	Oct	Nov	Déc	Total
Energie PV produite (kWh)	506.6	517.4	731.2	748.0	853.6	821.2	879.4	860.5	672.2	685.3	539.6	466.1	8281.1

La figure IV.9 prouve que le système photovoltaïque peut générer parfois une surproduction durant les mois de mars, avril et octobre. Elle s'élève à 503.99 kWh, 406.49 kWh et 158.58 kWh respectivement.

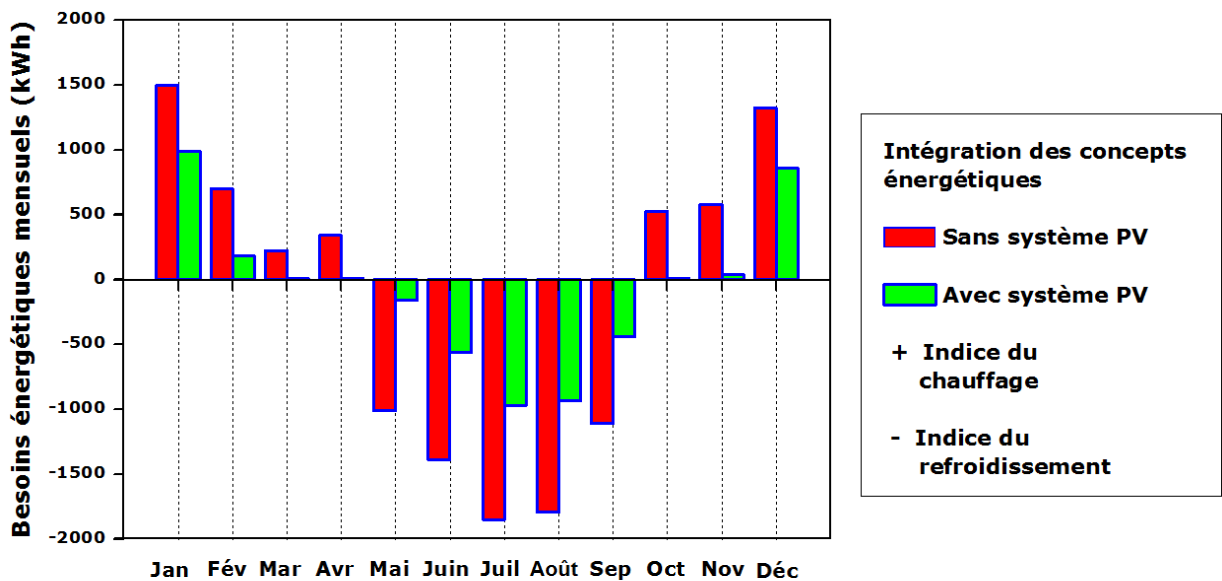


Figure IV.9 : Besoins énergétiques mensuels, intégration des concepts passifs et actifs avec un système photovoltaïque de 2880 Wc.

Les valeurs obtenues montrent qu'une diminution conséquente a été soulevée au cours des mois de novembre, décembre, janvier et février. Elle s'est arrêtée à 93.26%, 35.14%, 33.84% et 73.78% respectivement. Cependant, la période qui s'étend du mois de mai au mois de septembre correspond respectivement à une minimisation de l'ordre de 84.66%, 59.33%, 47.59%, 48.00% et 60.63%.

L'intégration d'un système photovoltaïque de 2880 Wc installée permet d'aboutir à une habitation présentant des besoins en énergie de 5128.37 kWh/an (47.93 kWh/an/m²), équivalant à un taux de diminution de 58.44%. Ce pourcentage est exprimé par rapport aux besoins énergétiques annuels (12340.41 kWh/an) d'une habitation couplée aux concepts énergétiques étudiés au chapitre précédent, mais sans compter

l'intégration du système photovoltaïque qui peut alimenter la charge de 1.816 kWh.

Les bâtiments du futur donc devront être peu consommateurs d'énergie, la France par exemple a mis en place des normes sous forme de réglementations thermiques (figure IV.10) [8-11]. Ces séries de réglementations thermiques (RT2000, RT2005, RT2012) sont de plus en plus exigeantes au fil du temps. Les exigences sont passées d'une moyenne de 150 kWh/m²/an dans la RT 2005 à 50 kWh/m²/an pour la RT 2012 [8]. L'évolution croissante de ces exigences avait pour but d'atteindre des conditions environnementales confortables à moindre consommation d'énergie. Pour atteindre le niveau énergétique des BBC (bâtiment basse consommation), la nouvelle réglementation thermique (RT 2012) a imposé certaines exigences dans les maisons neuves [8,10].

En conséquence, nous pouvons attribuer une étiquette énergétique pour ce type d'habitat selon les différents cas, en particulier pour notre région saharienne. Il sera possible d'émettre une étiquette énergétique, en tenant compte des scénarios d'occupation, du mode de vie et de toutes les données nécessaires. En intégrant les concepts énergétiques étudiés précédemment, ce type de bâtiment peu rejoindre les constructions ayant un label énergétique de "type C". En renforçant le système photovoltaïque, nous pouvons attribuer un label énergétique de "type A", c'est-à-dire une maison basse consommation BBC.

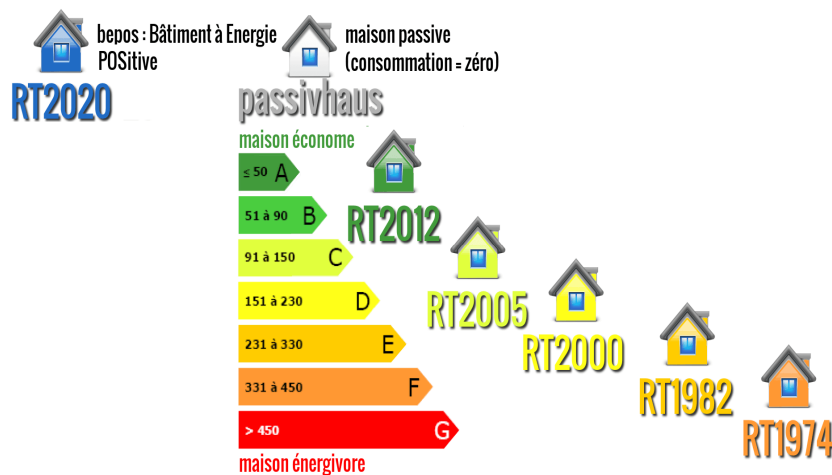


Figure IV.10 : Réglementation thermique et évolutions successives [9].

IV.9. Expérimentation et amélioration des performances d'un capteur solaire sous vide de type IMEXSol 200L

Les chauffe-eau solaires sont de plus en plus utilisés dans le monde entier. Les capteurs solaires à tubes sous vide deviennent de plus en plus appréciés en raison de leurs performances globales par rapport aux capteurs plans à eau, en particulier dans des conditions météorologiques moins favorables.

Ce dispositif solaire est destiné à la production d'eau chaude sanitaire par énergie solaire, en chauffant un fluide caloporteur qui s'écoule dans un circuit fermé. Les tubes sous vide absorbent le rayonnement solaire pour le transformer en chaleur. Cette chaleur est transportée par le fluide caloporteur qui circule dans les tubes sous vides pour ensuite rejoindre la cuve du stockage (de 200 litres de capacité). Les apports thermiques vont être restitués par un échangeur de chaleur se trouvant à l'intérieur de la cuve. Ce processus permet à l'eau stockée dans cette cuve de se chauffer.

La présente étude est portée sur l'effet du rayonnement solaire et du débit du fluide caloporteur (variables indépendantes) issu des données expérimentales sur les températures du fluide à la sortie du capteur et de l'eau de la cuve du stockage (variables dépendantes). L'optimisation de ces deux paramètres a été basée sur la Méthode des Surfaces de Réponses "RSM". L'expérimentation de ce système s'est établie en mode statique, c'est-à-dire sans soutirage d'eau.

IV.9.1. Description du banc d'essai

Un banc d'essai a été installé sur une terrasse de l'atelier de l'Unité de Recherche Appliquée aux Energies Renouvelables à Ghardaïa (figure IV.11). Le système solaire "IMEXSol 200L" comporte :

- Un capteur solaire à 12 tubes sous vide.
- Un fluide caloporteur antigel "CALOP 30D", mélange du propylène, du glycol et de l'eau.
- Une cuve de stockage d'eau chaude isolée thermiquement.

- Un échangeur de chaleur thermique à l'intérieur de la cuve.
- Une station solaire avec une vase d'expansion.
- Un régulateur de type "RESOL" connecté avec quatre thermistances de type "pt1000".



Figure IV.11 : Images descriptives du banc d'essai.

Ce capteur solaire est composé d'une série de 12 tubes transparents en verre de longueur de 1.73 m et 4 cm de diamètre. Dans chaque tube, on trouve un absorbeur qui capte le rayonnement solaire et un échangeur de type U-pipe pour faciliter le transfert de l'énergie thermique. Les capteurs sous vide permettent d'atteindre des hautes températures (150 °C). Le

vide créé à l'intérieur des tubes permet de réduire de manière significative les déperditions lors de la montée en température. Les 12 collecteurs de type U-pipe sont remplis par un fluide caloporteur qui transporte les calories captées par le capteur solaire vers le ballon du stockage d'eau chaude. Le transfert de chaleur s'est établi par convection forcée (fonction de la pompe de la station). L'orientation est en plein sud avec une inclinaison de 32°.

Le régulateur est un dispositif qui commande le débit du fluide caloporteur par une pompe solaire qui fait circuler le fluide au sein du circuit reliant le capteur et la cuve. Le rôle de ce système est de commander la station solaire et l'appoint électrique qui sera éliminé le long de ce travail.

Le ballon de stockage est un réservoir équipé de plusieurs moyens automatiques de contrôle et de protection: contrôle thermostatique, protection pour les températures élevées et moyennes et protection de pression (soupape P/T et clapet anti-retour). Il est aussi équipé par une résistance (l'appoint) chauffante électrique complémentaire. Le ballon solaire transmet les calories apportées par le liquide caloporteur à l'eau (grâce à l'échangeur) et stocke l'eau chaude.

Les quatre sondes servent à mesurer les températures du fluide caloporteur à l'entrée, à la sortie de capteur, aux niveaux inférieur et supérieur de l'eau du réservoir.

Le régulateur calcule la différence entre la température du fluide caloporteur à la sortie du capteur et celle de l'eau au niveau inférieure de la cuve. Si cette différence est supérieure ou égale à la valeur d'activation préétablie, la pompe solaire se met en marche et le réservoir est chauffé jusqu'à ce que sa température atteigne la valeur de désactivation prédéfinie ou sa température maximale de l'eau fixée par l'utilisateur.

IV.9.2. Méthode des surfaces de réponses

La méthode des surfaces de réponses "RSM" est un outil puissant, qui a pour but de déterminer et explorer les relations entre les variables

dépendantes et indépendantes impliquées dans une expérience et optimiser les différents processus [12].

Les procédures de surface de réponse impliquent la stratégie expérimentale, les méthodes mathématiques, et l'inférence statistique, qui, lorsqu'elles sont combinées, permettent aux utilisateurs de faire une exploration empirique efficace du système [13].

La stratégie expérimentale permet à l'analyste d'explorer la surface de réponse avec la même précision dans n'importe quelle direction. La conception expérimentale limite initialement la région sous enquête. Suite à l'enquête initiale, la conception expérimentale permet à l'analyste d'explorer la surface de réponse d'une manière systématique dans la direction qui offre la voie la plus prometteuse pour l'amélioration [14].

La méthode "RSM" peut être appliquée à tout système qui comporte les éléments clés suivants:

- un critère d'efficacité, qui est mesurable sur une échelle continue.
- variables indépendantes quantifiables qui affectent la performance du système.

Compte tenu de ces conditions, RSM propose des techniques pour trouver la réponse optimale du système d'une manière efficace [15].

Le principal avantage de cette méthode est que la quantité de données nécessaires à l'évaluation, l'analyse et l'optimisation réduisent de manière significative le nombre d'expériences requises. RSM est une méthode plus rapide et plus économique pour la collecte des résultats de recherche [16]. La méthodologie se base sur des formulations mathématiques et statistiques, elle est largement utilisée pour modéliser et analyser un processus dans lequel la réponse d'intérêt est affectée par diverses variables. L'objectif de cette méthode est d'optimiser les réponses de chaque système. Les paramètres qui influent sur le processus du système sont appelés variables indépendants, tandis que les réponses sont appelées variables dépendants. La méthode RSM a été utilisée dans de nombreux domaines à savoir : l'optimisation des performances thermiques des capteurs solaires à tube sous vide [17], l'optimisation de

la position du miroir parabolique dans un cuiseur solaire [18], l'optimisation de l'extraction des matières végétales [19], l'optimisation de la production d'hydrogène [20] et des paramètres du séchage solaire [21, 22].

Le logiciel STATGRAPHICS Centurion (VERSION 16) a été utilisé à cette fin. RSM a généré la table pour le plan expérimental. Cette stratégie a été largement utilisée dans le développement production/processus. Pour étudier l'effet des paramètres opératoires relatifs au chauffage d'eau. Nous avons retenu et privilégié deux paramètres opératoires: le rayonnement solaire (entre 250 et 850 w/m²) et le débit du fluide caloporteur (entre 0.6 et 3 l/min). Après avoir choisi les paramètres opératoires qui sont les plus influents, et en raison d'un grand domaine de variation possible de chaque paramètre, il a été convenable de procéder par une méthode d'étude statistique capable de cerner, au moindre coût l'expérimentation et le domaine d'exploitation des paramètres. Ainsi, au cours de la présente étude, nous avons adopté la méthode de surface de réponse, il s'agit d'un plan de conception spécifiée par l'utilisateur avec deux facteurs, chacun a cinq niveaux différents. Le plan d'expérience réalisé est présenté dans le tableau IV.6. Il s'agit d'aboutir à des échantillons adaptés selon le plan d'expériences indiqué sur le tableau IV.7. La relation entre les variables indépendantes "le rayonnement solaire (x_1) et le débit du fluide caloporteur (x_2)" a été exprimée mathématiquement sous la forme d'un modèle polynomial, ce qui a donné les deux réponses en fonction de ces variables:

- La température du fluide caloporteur à la sortie du capteur (y_1) et,
- La température de l'eau dans le niveau inférieur de la cuve de stockage (Y_2).

Une équation polynomiale du second ordre peut être écrite sous la forme générale suivante:

$$y_k = a_0 + \sum_{i=1}^2 a_i x_i + \sum_{i=1}^2 \sum_{j=1}^2 a_{ij} x_i x_j \quad (\text{IV.19})$$

Tableau IV.6 : Niveaux des variables utilisées pour la conception spécifiée par l'utilisateur.

Variables	Paramètres	Niveaux de conception spécifiée par l'utilisateur				
x_1	Rayonnement solaire (w/m^2)	250	400	550	700	850
x_2	Débit du fluide caloporteur (l/min)	0.6	1.2	1.8	2.4	3

Tableau IV.7 : Conditions et résultats de conception expérimentale, basés sur le plan de conception spécifiée par l'utilisateur à cinq niveaux.

N	Valeurs des paramètres		Valeurs de réponse			
	x_1 (w/m^2)	x_2 (l/min)	y_1 en °C		y_2 en °C	
			Valeurs observées	Valeurs prédites	Valeurs observées	Valeurs prédites
1	250	0.6	46.5	47.6914	38.8	38.8257
2	400	0.6	57.2	56.2931	46.4	45.4051
3	550	0.6	65.5	63.8777	52.0	51.6503
4	700	0.6	70.8	70.4451	57.8	57.5611
5	850	0.6	75.7	75.9954	62.7	63.1377
6	250	1.2	46.0	46.5766	41.3	42.3217
7	400	1.2	53.9	54.5183	47.1	48.5051
8	550	1.2	60.7	61.4429	52.9	54.3543
9	700	1.2	66.4	67.3503	58.4	59.8691
10	850	1.2	70.9	72.2406	63.5	65.0497
11	250	1.8	46.6	45.4103	44.9	43.3577
12	400	1.8	53.4	52.6920	51.5	49.1451
13	550	1.8	59.9	58.9566	57.8	54.5983
14	700	1.8	64.9	64.2040	63.3	59.7171
15	850	1.8	69.2	68.4343	67.8	64.5017
16	250	2.4	44.2	44.1926	40.4	41.9337
17	400	2.4	49.0	50.8143	43.8	47.3251
18	550	2.4	56.4	56.4189	49.8	52.3823
19	700	2.4	61.1	61.0063	55.3	57.1051
20	850	2.4	64.8	64.5766	59.2	61.4937
21	250	3.0	44.3	42.9234	40.0	38.0497
22	400	3.0	47.6	48.8851	42.7	43.0451
23	550	3.0	53.5	53.8297	48.5	47.7063
24	700	3.0	57.7	57.7571	53.0	52.0331
25	850	3.0	61.0	60.6674	56.2	56.0257

IV.10. Résultats et discussions

IV.10.1. Analyse des surfaces de réponses et interprétation

Les données expérimentales ont été utilisées pour calculer les coefficients de l'équation quadratique. Par ailleurs les tableaux IV.8 et IV.9 synthétisent les résultats de l'analyse de la variance des réponses, les coefficients des modèles mathématiques et la valeur de p utilisée comme moyen pour vérifier la signification de chaque coefficient et pour indiquer la force d'interaction de chaque paramètre. Dans notre cas, les modèles avec une valeur de p inférieure à 0.05 indiquent que les termes du modèle sont significatifs, c'est-à-dire que ce modèle convient à cette expérience. Par ailleurs, ceux avec des valeurs de p supérieures à 0.05 indiquent que les termes du modèle ne sont pas significatifs [23].

Le coefficient de détermination R^2 , représente la proportion de variation de la réponse attribuée au modèle plutôt que de l'erreur aléatoire. Nous avons suggéré qu'un bon ajustement des modèles devrait avoir R^2 pas moins de 90%. Lorsque R^2 est proche de l'unité, les modèles empiriques sont adaptés pour ajuster les données réelles.

Sur la base de ces résultats, une relation empirique entre les réponses du système et les variables indépendantes a été établie pour le chauffage de l'eau sanitaire puis exprimée par les équations polynomiales du second ordre comme suit:

$$y_1 = 31.06 + 0.08 x_1 + 0.10 x_2 - 0.000023 x_1^2 - 0.071 x_2^2 - 0.0073 x_1 x_2 \quad (\text{IV.20})$$

$$y_2 = 20.50 + 0.051 x_1 + 13.08 x_2 - 0.0000074 x_1^2 - 3.42 x_2^2 - 0.0044 x_1 x_2 \quad (\text{IV.21})$$

L'analyse des surfaces de réponses des données des tableaux IV.8 et IV.9 montre que la relation entre les réponses et les variables indépendantes (rayonnement solaire et écoulement du fluide) est quadratique, avec un bon coefficient de régression (pour Y_1 $R^2 = 99.0237 \%$ et pour Y_2 $R^2 = 94.6654 \%$). Ceci justifie le bon accord entre les données expérimentales et les deux réponses prédites. La figure IV.12 nous montre une comparaison entre les valeurs expérimentales et prédites.

Tableau IV.8 : Analyse de variance "ANOVA", termes linéaires, d'interactions et quadratiques pour la réponse y_1 et coefficients de modèle de prédiction.

Source	Coefficients	Somme des carrés	Degré de liberté DDL	Moyenne des carrés	Valeur de P
x_1	0.0764368	1656.58	1	1656.58	0.0000
x_2	0.10381	315.507	1	315.507	0.0000
x_1^2	- 0.0000226	18.1051	1	18.1051	0.0006
x_2^2	- 0.0714286	0.0462857	1	0.0462857	0.8363
$x_1 x_2$	- 0.0073333	43.56	1	43.56	0.0000
Résiduelle		20.051	19	1.05531	
R^2 (%)	99.0237				
R^2 , ajusté pour les DDL, (%)	98.7668				
Esti de l'écart type du résidu	1.02728				
Erreur absolue moyenne	0.737646				
Test de Durbin-Watson	1.53068				

Tableau IV.9 : Analyse de variance "ANOVA", termes linéaires, d'interactions et quadratiques pour la réponse y_2 et coefficients de modèle de prédiction.

Source	Coefficients	Somme des carrés	Degré de liberté DDL	Moyenne des carrés	Valeur de P
x_1	0.0513314	1397.09	1	1397.09	0.0000
x_2	13.0767	48.6098	1	48.6098	0.0044
x_1^2	-0.0000074285	1.95557	1	1.95557	0.5246
x_2^2	-3.41667	105.903	1	105.903	0.0001
$x_1 x_2$	-0.0044	15.6816	1	15.6816	0.0821
Résiduelle		88.4298	19	4.6542	
R^2 (%)	94.6654				
R^2 , ajusté pour les DDL, (%)	93.2616				
Esti de l'écart type du résidu	2.15736				
Erreur absolue moyenne	1.55589				
Test de Durbin-Watson	0.767507				

Il a été constaté qu'à travers ces tableaux, les modèles polynomiaux du deuxième ordre des deux réponses y_1 et y_2 sont significatifs lorsque la plupart des valeurs P sont inférieures à 0.05. Dans ce cas, x_1 , x_2 , x_1^2 et $x_1 x_2$ sont des termes du modèle significatif relatifs à la première réponse y_1 , alors que les termes x_1 , x_2 et x_2^2 correspondent à la deuxième réponse Y_2 .

Comme résultats, les modèles utilisés dans cette étude étaient capables d'identifier l'état du fonctionnement optimal de ce système destiné au chauffage d'eau sanitaire. La corrélation entre la valeur de la réponse observée et celle de la réponse prédite est décrite en traçant les différentes courbes données par la figure IV.12. Les valeurs obtenues approuvent une bonne corrélation existante entre les réponses issues du système expérimental et celles prédites par la relation mathématique formulée par les équations IV.20 et IV.21.

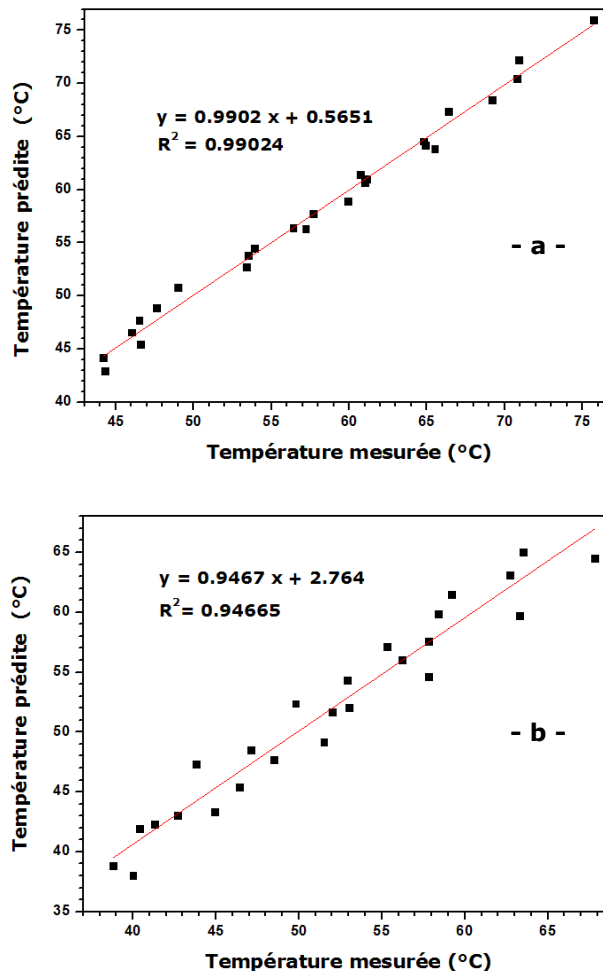


Figure IV.12 : Corrélation linéaire entre les réponses calculées et mesurées du système. a : température du fluide à la sortie du capteur, b : température de l'eau dans la cuve de stockage.

Quoique, les surfaces de réponses en 3D et les courbes isoplèthes peuvent être présentées par les figures IV.13 et IV.14 respectivement. Ces figures montrent l'effet du rayonnement solaire x_1 et le débit du fluide caloporteur x_2 sur les températures du fluide caloporteur à la sortie du capteur y_1 et de l'eau dans la cuve du stockage y_2 . On remarque que y_1 est proportionnel par rapport à x_1 et inversement proportionnel par rapport à x_2 . Cependant, y_2 est proportionnel par rapport à x_1 et x_2 au alentour du niveau moyen. Pour des valeurs de x_2 plus basses ou plus élevées, les deux réponses augmentent lorsque le rayonnement solaire augmente.

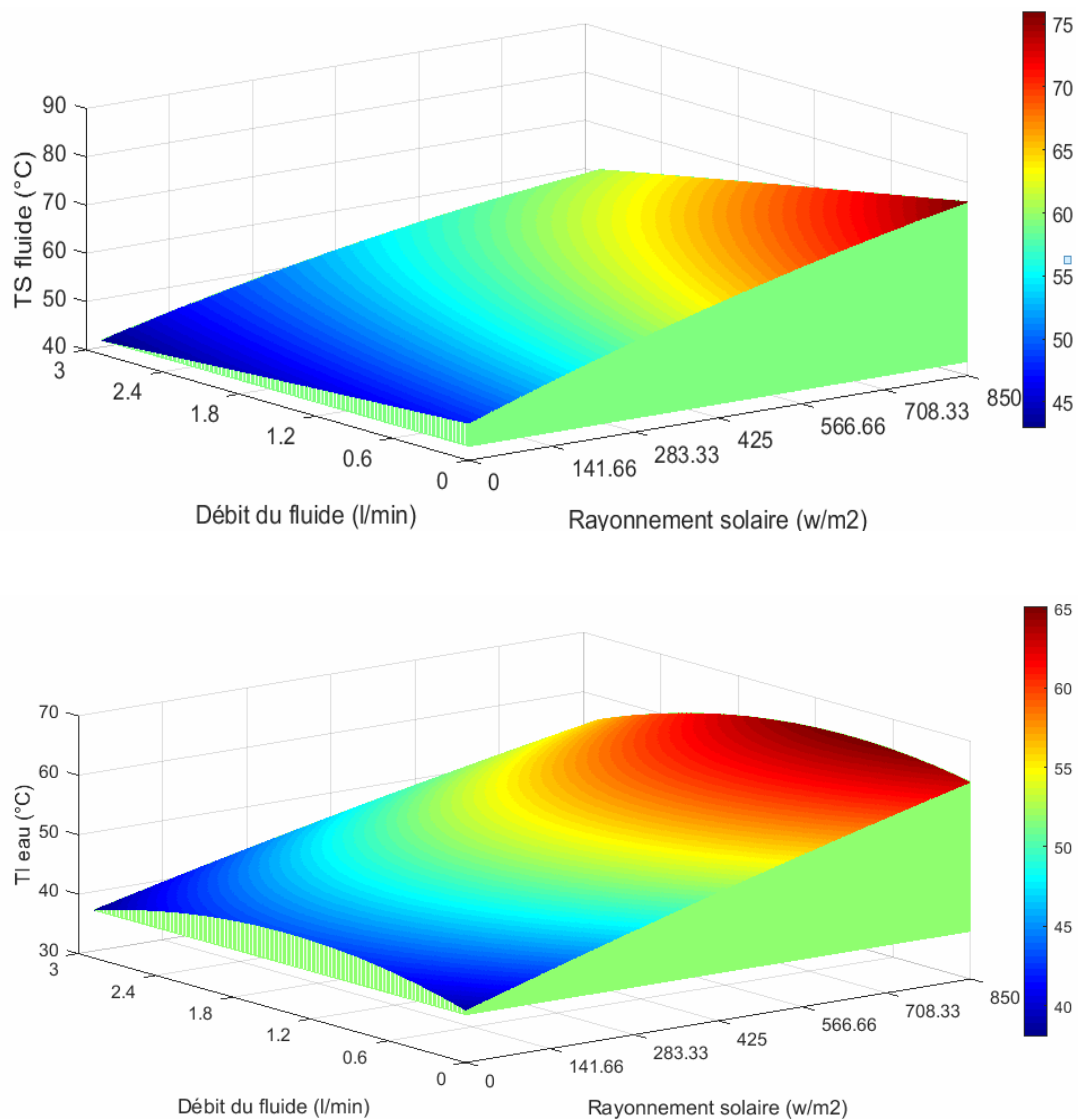


Figure IV.13 : Surfaces de réponses.

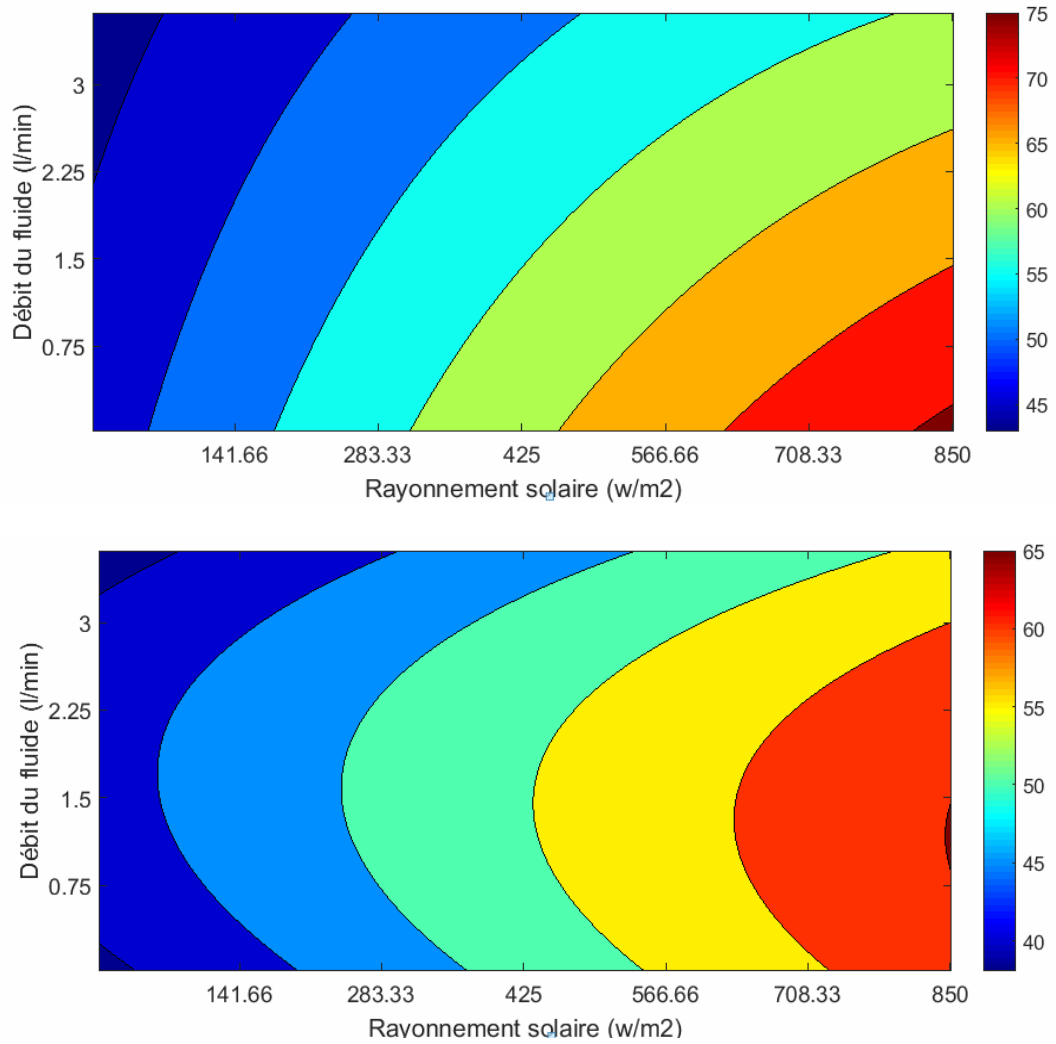


Figure IV.14 : Courbes isoplèthes.

IV.10.2. Optimisation des paramètres

Selon les résultats précédents, le rayonnement solaire est la variable la plus influente, de telle sorte que l'optimisation du rayonnement solaire correspond toujours à la valeur maximale de l'intervalle. La combinaison des niveaux des facteurs qui maximisent les deux réponses et l'optimisation de chacune des variables sont données par le tableau IV.10.

La valeur optimale du rayonnement solaire est de 850 W/m², l'optimum du débit s'est arrêté à 1.36641 l/min. Faisant suite à ces conditions appropriées, la température du fluide caloporteur à la sortie du capteur peut atteindre une valeur de 75.9954 °C, alors que la

température de l'eau dans le ballon du stockage peut atteindre une valeur maximale de 65.1443 °C.

Tableau IV.10 : Niveaux des variables utilisées en appliquant la méthode des surfaces de réponses.

Niveaux	Valeurs optimales des variables indépendantes		Réponses	
	Rayonnement solaire (w/m ²)	Débit du fluide (l/min)	T _s fluide (°C)	T _I eau (°C)
	x ₁	x ₂	y ₁	y ₂
Bas	250	0.6	46.5	38.8
Haut	850	3	61	56.2
Optimum	850	1.36641	75.9954	65.1443

IV.11. Conclusion

Il est à rappeler (voir chapitre 3) que le couplage de certaines techniques passives et actives a permis de passer d'une habitation présentant des besoins en énergie de l'ordre 51672.43 kWh/an à une habitation qui consomme 11677.5717 kWh/an. Ce passage correspond à un taux de diminution de 77.40%, ce qui a permis à ce logement de rejoindre les constructions ayant un label énergétique de type C avec une consommation équivalente à 109.1362 kWh/an/m².

En renforçant les concepts énergétiques par un système photovoltaïque autonome optimal en installant 2880 Wc, l'étiquette énergétique qui doit être attribuée dans ce cas est de type A (47.93 kWh/an/m²). Mais vu la situation économique de plus en plus exigeantes au fil du temps de notre pays, il nous semble judicieux d'améliorer plus l'efficacité de ce type de logements. En dotant donc ce système photovoltaïque par un système intelligent, nous pouvons montrer que l'utilisation de ce système intelligent dans une habitation doit être programmée avec un souci d'efficacité. Le fait d'insérer l'intelligence dans la gestion électrique permet de maintenir une consommation optimale et essentiellement de compenser les besoins énergétiques requis dus aux déperditions thermiques de l'enveloppe et au chauffage d'eau. Le système

intelligent dans ce cas contribue à une rationalisation de l'ordre de 26.43% en se référant aux relevés des énergies consommées d'une charge composée de lampes, d'un climatiseur et d'un ventilateur. Le système intelligent va permettre à l'utilisateur d'ajuster le flux d'électricité en temps réel et de permettre une gestion plus efficace. Par ailleurs, l'énergie électrique globale stockée dans les batteries solaires favorise un gain en énergie qui s'est fixé à 23.78 %. De même, cela confirme encore une fois que le système intelligent contribue à la rationalisation de l'énergie.

En deuxième partie, une bonne marge de fonctionnement a prouvé que le chauffe-eau solaire est sûrement un système avec plus d'atouts que d'inconvénients. Nous avons déjà mentionné que ce dispositif peut fournir au minimum 60% des besoins mensuels totaux en eau chaude pour cette famille de 5 personnes. Mais en optimisant ses paramètres de fonctionnement, on pourra avoir plus de rentabilité et une meilleure production à un débit qui se rapproche de 1.37 l/min. Selon les expériences menées, l'optimisation des paramètres étudiés a montré que ce dispositif solaire peut fournir au minimum 70% des besoins mensuels totaux en eau chaude sous un ciel clair.

Références

1. J. Cédric, Méthodologie de dimensionnement sur cycle de vie d'une distribution en courant continu dans le bâtiment : Applications aux câbles et convertisseurs statiques DC/DC, Thèse de Doctorat de l'École Normale Supérieure de Cachan Electronique – Electrotechnique – Automatique, Novembre 2012.
2. Les meilleurs chauffe-eaux solaires en 2020, <https://meilleurtest.fr/comparatif-chauffe-eaux-solaire/>, accessible en septembre 2020.
3. Programmation d'un ARDUINO, elearning.univ-annaba.dz, site web : https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&cad=rja&uact=8&ved=2ahUKEWj38Jec8YHsAhVPjqQKHbXJCh0QFjAFegQIBhAB&url=https%3A%2F%2Felearning.univ-annaba.dz%2Fmod%2Fresource%2Fview.php%3Fid%3D17370&usg=AOvVaw2-1bMZBnr9wq9Exo_oKO39, accessible en septembre 2020.

4. H. Hassini, Modélisation, simulation et optimisation d'un système hybride éolien-photovoltaïque, Thèse de Doctorat en Sciences Spécialité Physique énergétique, Université Abou-Bekr Belkaid, Tlemcen, 2010.
5. A. Gama, Etude et réalisation d'un banc d'essai hybride photovoltaïque thermodynamique, Thèse de Magister, Ecole Nationale Polytechnique d'El-Harrach, 2007.
6. A. Chel, G.N. Tiwari, A. Chandra, Simplified method of sizing and life cycle cost assessment of building integrated photovoltaic system, *Energy and Buildings*, vol 41, 1172 – 1180, 2009.
7. W.X. Shen, Optimally sizing of solar array and battery in a standalone photovoltaic system in Malaysia, *Renewable Energy*, Vol 34, 348 – 352, 2009.
8. S. Gaaloul, Interopérabilité basée sur les standards Modelica et composant logiciel pour la simulation énergétique des systèmes de bâtiment, Thèse de Doctorat en génie électrique, Université de Grenoble, 2012.
9. E. Jayr, J. Laurent, A. Lebert, et J. Chevalier, (2011) Bilan Carbone® appliqué au bâtiment, guide méthodologique. ADEME, CSTB., 56p.
10. J. Villot, Bâtiments et Facteur 4 : de l'émergence d'un objectif global à son application au niveau local. Analyse des problématiques de rénovation dans le secteur résidentiel à caractère social, Thèse de Doctorat en Sciences et Génie de l'Environnement, École Nationale Supérieure des Mines de Saint-Étienne, 2012.
11. H. Kadraoui, Diagnostic et solutions adaptées pour l'amélioration de l'efficacité énergétique d'une construction multizone énergivore, thèse de Doctorat en Sciences Spécialité Énergies Renouvelables, Université Abou-Bekr Belkaid, Tlemcen, 2019.
12. D. Bas, I.H. Boyaci, Modelling and optimization, Usability of response surface methodology, *Journal of Food Engineering*, vol 78, 836 – 845, 2007.
13. R.H. Myers, A.I. Khuri, W.H. Carter, Response Surface Methodology, 1966-1988, *Technometrics*, vol 31, 137 – 157, 1989.
14. A. Bono, H.C. Mun, M. Rajin, Statistical analysis of natural ingredient based lipstick formulation, In *Proceedings of the Symposium of Malaysian Chemical Engineers*, Perak, SOMChe Universiti Teknologi Petronas, 13 – 14, 2004.

15. R.F. Powers, Optimization models for logistics decisions, *Journal of Business Logistics*, vol 10, 106 – 121, 1989.
16. D. Krishnaiah, A. Bono, R. Sarbatly, R. Nithyanandam, S.M. Anisuzzaman, Optimisation of spray drying operating conditions of *Morindacitrifolia* L. fruit extract using response surface methodology, *Journal of King Saud University – Engineering Sciences*, vol 27, 26 – 6, 2015.
17. M.M. Sarafraz, I. Tlili, Z. Tian, M. Bakouri, M.R. Safaei, Smart optimization of a thermosyphon heat pipe for an evacuated tube solar collector using response surface methodology (RSM), *Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications*, vol 534, 122 – 146, 2019.
18. H. Zamani, M. Moghiman, A. Kianifar, Optimization of the parabolic mirror position in a solar cooker using the response surface method (RSM), *Renewable Energy*, vol 81, 753-759, 2015.
19. A.Y. Aydar, Utilization of response surface methodology in optimization of extraction of plant materials. *Statistical Approaches with Emphasis on Design of Experiments Applied to Chemical Processes*, 2018.
20. V.A. Bamidele, A.A. Ghazali, M.Y.M Yassin, S. Abdullah, Optimization of hydrogen production by photocatalytic steam methane reforming over lanthanum modified Titanium (IV) oxide using response surface methodology, *International journal of hydrogen energy*, 1-11, 2018.
21. O. Adeodu, A. Daniyan, A. Ilesanmi, Development and Optimisation of Drying Parameters for Low-Cost Hybrid Solar Dryer Using Response Surface Method, *Journal of Sustainable Bioenergy Systems*, vol 8 (2), 23-35, 2018.
22. E.G. Ikranga, K.C. Umani, Optimization of process conditions for drying of catfish (*Clarias gariepinus*) using Response Surface Methodology (RSM), *Food Science and Human Wellness*, vol 8 (1), 46-52, 2019.
23. A. Bensaha, F. Benkouider, S.M.A. Bekkouche, A. Abdellaoui, T. Chergui, A. Benseddik, An experimental study of an evacuated tube solar collector using the response surface methodology (RSM), *Modelling, Measurement and Control B*, Vol. 88, No. 2-4, pp. 148-153, 2019. DOI: https://doi.org/10.18280/mmc_b.882-414

Conclusion Générale

Conclusion générale

En général, les éléments de conceptions bioclimatiques sont des notions indiscutables du bien être à l'intérieur d'une construction mais essentiels pour la transition énergétique. Les intégrer favorise une optimisation de la performance énergétique du bâtiment.

Tout d'abord, dans cette thèse, l'examen de la performance de certains modèles d'estimation du rayonnement solaire (Perrin, Capderou et R-sun) a été effectué. Nous avons constaté que le modèle de Perrin donne une bonne estimation du rayonnement solaire, et plus particulièrement pour une incidence sur un plan incliné (32°). Alors que l'estimation du rayonnement global sur une surface horizontale a montré que le modèle de Capderou donne un meilleur résultat.

Pour un habitat basse consommation d'énergie, la meilleure orientation est celle du plein sud puisqu'elle permet de capter le maximum de rayonnement solaire durant la journée. Les vitres orientées au Sud permettent un gain d'énergie plus important par rapport aux autres orientations en hiver, et moins important en été.

Nous avons effectué ensuite un diagnostic et une évaluation des besoins énergétiques d'une habitation multizone énergivore. Les besoins énergétiques de chauffage et de refroidissement ont été déterminés en fonction d'un nombre important de paramètres d'entrée en utilisant la méthode de degrés jours.

L'intégration des différentes stratégies (passives et actives) pour une habitation énergivore constitue une solution technique et architecturale permettant d'assurer un bon confort et de réduire les besoins énergétiques. Ce travail constitue une contribution à l'étude de l'impact de ces concepts sur la performance énergétique des bâtiments, le confort des occupants et la consommation énergétique.

Il s'est trouvé que l'isolation extérieure appliquée à l'enveloppe de l'habitat est la solution la plus efficace pour éliminer les ponts thermiques. L'impact de ce concept passif sur la réduction des besoins énergétiques est plus important car il favorise une diminution de presque 60 %. Le couplage de tous les concepts énergétiques mentionnés auparavant va diminuer la consommation à une valeur importante de 77.4 %. Ces économies en énergie sont plus élevées au cours de la saison froide, la diminution résultante a atteint les 95.71%, tandis que la réduction des besoins énergétiques en périodes de surchauffe était de l'ordre de 65.66%. Cette minimisation importante des besoins énergétiques a permis à notre habitat d'être classé dans les constructions ayant un label énergétique de type C, avec une consommation équivalente à 109.1362 kWh/an/m².

L'intégration d'un système photovoltaïque autonome de grande capacité (2880 Wc) permet de soutenir les concepts énergétiques afin de baisser les besoins énergétiques de l'habitation à une valeur de 5128.37 kWh/an, ce qui est équivalent à 47.93 kWh/an/m². Cette dernière correspond à un taux de diminution de 58.44% par rapport à la consommation initiale (109.1362 kWh/an/m² avec une intégration des concepts passifs et actif). Cette réduction en énergie est équivalente à 90.03% par rapport à la consommation énergétique, cas d'une maison énergivore. L'étiquette énergétique attribuée est de type A, correspondant à un bâtiment basse consommation.

Au cours de cette thèse, nous avons proposé un système intelligent pour gérer et commander l'énergie électrique de certains équipements à savoir les lampes d'éclairage, un ventilateur et un climatiseur. L'objectif consiste à l'utilisation rationnelle de l'énergie, ce qui a permis de réduire de plus l'énergie utilisée et donc augmenter l'énergie photovoltaïque stockée dans les batteries solaires.

La méthode de surface des réponses à été utilisée pour optimiser deux paramètres indépendants; le débit du fluide caloporteur et le rayonnement solaire. Cette méthode a favorisé une amélioration des

performances thermiques du chauffe-eau, sachant que le système solaire tout entier a pu assurer au minimum 70% (équivalent à une augmentation de 10%) des besoins mensuels en eau chaude sous un ciel clair.

Production scientifique

1. A. Bensaha, F. Benkouider, S.M.A. Bekkouche, A. Abdellaoui, T. Chergui, A. Benseddik, An experimental study of an evacuated tube solar collector using the response surface methodology (RSM), Modelling, Measurement and Control B, Vol. 88, No. 2-4, pp. 148-153, 2019. DOI: https://doi.org/10.18280/mmc_b.882-414
2. A. Bensaha, S.M.A. Bekkouche, F. Benkouider, M.R. Yaiche, N. Benamrane, A. Abdellaoui, Concepts du solaire passif : Orientation des baises vitrées et gains solaires, Revue des Sciences et Sciences de l'Ingénieur (RSSI), Vol. 07, N°. 01, 01-07, July 2018.
3. A. Bensaha, F. Benkouider, S.M.A. Bekkouche, Estimation du rayonnement solaire en ciel clair par des modèles empiriques: Application au site de Ghardaïa (Algérie), 1st International Seminar on the Apport of the Simulation in Technological Innovation, Ghardaïa (Algeria), Mars, 7-8, 2017.
4. A. Bensaha, F. Benkouider, S.M.A. Bekkouche, T. Chergui, Expérimentation d'un capteur solaire sous vide muni d'un système de stockage efficace de type IMEXSol 200L sous des conditions climatiques sahariennes. Premières journées nationales sur les énergies renouvelables et le développement durable, Ain-Temouchent, 14 et 15 Juin 2019.
5. A. Bensaha, F. Benkouider, S.M.A. Bekkouche, A. Cheknane, Design and size optimization of the PV modules for stand-Alone photovoltaic systems, Springer Proceedings in Energy, Proceedings of the 1st International Conference on Renewable Energy and Energy Conversion Oran, ICREEC 2019 pp 167-172. https://doi.org/10.1007/978-981-15-5444-5_21