

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE FRERES MENTOURI CONSTANTINE 1

FACULTE DES SCIENCES EXACTES

DEPARTEMENT DE PHYSIQUE

N° d'ordre 78/DS/2020

Série 10/phy/2020

THESE

PRESENTEE POUR OBTENIR LE DIPLOME DE DOCTORAT EN SCIENCES

EN PHYSIQUE

SPECIALITE: ENERGIES RENOUVELABLES

THEME

Efficacité énergétique:

Habitat à basse consommation d'énergie

Par

Mr. SAOUANE Izzeddine

Soutenue le: 18/11/2020

Devant le jury:

Président :	Boufendi Toufik	Pr	Univ. Frères Mentouri Constantine 1
Rapporteur :	Chaker Abla	Pr	Univ. Frères Mentouri Constantine 1
Examineur :	Bouhdjar Amor	D.R	CDER Alger
Examineur :	Chaker Abdelkader	Pr	ENP Oran
Examineur :	Draoui Belkacem	Pr	Univ. Tahri mohamed Bechar
Examineur :	Khiat Mounir	Pr	ENP Oran

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail:

A mes chers parents qui ont fait preuve de beaucoup de patience et de sacrifice, qu'ils trouvent ici un modeste témoignage de mon indéfini tendresse ... Il y a tant d'amour et de générosité dans vos âmes.

A ma femme qui m'a toujours encouragé et motivé tout au long de mes travaux.

A mes sœurs, ainsi qu'à tous ceux qui me sont chers.

A toute ma famille et mes amis.

Saouane Izzeddine

Remerciements

Je remercie en premier lieu, **Allah**, de m'avoir donné la force, la santé, la patience et la volonté durant toutes ces longues années.

Mes remerciements s'adressent tout d'abord à ma directrice de thèse, Madame la **Professeure Abla Chaker** de l'université frères Mentouri Constantine1, pour son aide précieuse, ses conseils et sa grande patience. Je salue également son dévouement pour son travail.

Je remercie le **Professeur Boufendi Toufik** de l'université frères Mentouri Constantine1, qui m'a fait l'honneur de présider le jury de cette thèse.

Pour avoir bien voulu évaluer ce travail de doctorat et participer à la soutenance, je remercie chaleureusement Monsieur **Bouhdjar Amor**, Directeur de recherche au Centre de Développement des Energies Renouvelables.

J'adresse mes plus vifs remerciements à Messieurs **Chaker Abdelkader** et **Khiat Mounir**, Professeurs de ENP Oran, pour avoir accepté d'examiner cette thèse et faire partie du jury.

J'exprime mes sincères remerciements au **Professeur Draoui Belkacem** de l'université de Tahri Mohamed de Béchar pour avoir accepté de faire partie du jury et évaluer ce travail.

Enfin, je remercie toute personne qui, de loin ou de près, a participé au succès de cette thèse.

Nomenclature

a	: Diffusivité thermique	[m ² /s]
a_s	: L'azimut	[°]
C	: Capacité électrique	[F]
C_{app}	: Capacité thermique apparente	[J/k]
C_l	: Capacité thermique massique à l'état liquide	[J/kg.K]
C_s	: Capacité thermique massique à l'état solide	[J/kg.K]
D	: Décharge maximale admissible par la batterie	[--]
E	: L'énergie totale moyenne nécessaire journalière	[J]
E_i	: L'énergie totale moyenne nécessaire journalière	[J]
FF	: Facteur de forme	[--]
f_l	: Fraction liquide	[--]
f_s	: Fraction solide	[--]
H	: Enthalpie	[J/kg]
H	: Hauteur	[°]
ΔH	: Décalage horaire	[h]
I	: Courant	[A]
I_b	: Eclairement solaire direct incident sur un plan incliné	[W/m ²]
I_{bh}	: Eclairement solaire direct incident sur un plan horizontal	[W/m ²]
I_{cc}	: Courant de court-circuit	[A]
I_{cell}	: Courant délivrée par une cellule	[A]
I_d	: Eclairement solaire diffus incident sur un plan incliné	[W/m ²]
I_D	: Courant de diode	[A]
I_{dh}	: Eclairement solaire diffus incident sur un plan horizontal	[W/m ²]
I_g	: Rayonnement global incident sur un plan incliné	[W/m ²]
I_{gh}	: Rayonnement global incident sur un plan horizontal	[W/m ²]
I_m	: Courant correspondant à la puissance maximale fournie	[A]
I_0	: Constante solaire	[W/m ²]
I_{reg}	: Intensité du régulateur	[A]
I_s	: Courant de saturation	[A]
K	: Constante de Boltzmann	[J/K]
L	: Longitude	[°]
L_F	: Chaleur latente de changement de phase	[J/K.kg]

M	: La masse	[kg]
N_s	: Le nombre de module à mettre en série	--
N_p	: Le nombre de module à mettre en série	--
P_c	: Puissance crête	[W]
P_m	: Puissance maximale	[W]
P_{ond}	: Puissance de l'onduleur	[W]
Pr	: Nombre de Prandtl	--
Q	: Quantité de chaleur	[J]
Q	: La charge électrique	[C]
R	: Résistance	[Ohm]
RMSE	: L'erreur quadratique moyenne	--
R^2	: Coefficient de détermination	--
Ra	: Nombre de Rayleigh	--
S	: Surface	[m ²]
Ste	: Nombre de Stefan	--
T	: Température	[K]
T_F	: Température de fusion	[K]
T	: Temps	[s]
TL	: Temps légal	[heure]
T_{LK}	: Facteur de trouble	--
T.SM	: Temps solaire moyen	[heure]
T.SV	: Temps solaire vrai	[heure]
TU	: Temps universel	[heure]
V	: Tension	[V]
V_{bat}	: Tension de la batterie	[V]
V_{co}	: Tension de circuit ouvert	[V]
V_m	: Tension correspondant à la puissance maximale fournie.	[V]
W	: L'angle horaire	[°]
Z	: Altitude de l'observateur	[m]

Caractères grecques

γ	: Rendement	[--]
β	: Angle d'inclinaison	[°]
λ	: Conductivité thermique	[W/m ² K]
ρ	: Masse volumique	[kg/m ³]
\varnothing	: Latitude	[°]
δ	: Déclinaison	[°]

Table des matières

<i>Introduction générale</i>	2
------------------------------------	---

Chapitre I : Les habitats à basse consommation d'énergie

I.1.Introduction.....	6
I.2.Situation énergétique et environnementale.....	6
I.2.1.Sur le plan mondial.....	7
I.2.2. En Algérie.....	8
I.3. Solutions de maîtrise de l'énergie.....	10
I.4. Energie et développement durable.....	12
I.4.1. Efficacité énergétique dans les bâtiments.....	13
I.4.2. Bâtiment performant "basse énergie"	13
a. Les labels MINERGIE® et MINERGIE-ECO®	13
b. Exemples de réalisations de bâtiments performants.....	14
I.4.3. Bâtiment très performant "très basse énergie"	16
a. Les labels MINERGIE-P® et Passivhaus.....	16
b. Exemples de réalisations de bâtiments très performants.....	17
I.4.4. Bâtiments zéro énergie ou à énergie positive.....	21
a. Exemples de réalisations de bâtiments à énergie positive.....	21
I.5.Les technologies retenues.....	25
I.5.1. L'enveloppe du bâtiment.....	25
I.5.2.Ventilation.....	27
I.5.3.Production d'énergie.....	27
I.5.4.Le stockage de la chaleur.....	28
I.6.Conclusion.....	28

Chapitre II : Les modèles de calcul de rayonnement solaire

II.1. Introduction.....	30
II.2. Notions d'astronomie.....	30
II.2.1. Mouvements de la terre autour du soleil.....	30
II.2.2. Les coordonnées célestes.....	31
II.2.2.1. Les coordonnées géographiques.....	31
II.2.2.2. les coordonnées horaires.....	32
II.2.2.3. Les coordonnées horizontales.....	33
II.2.3. Les temps solaires.....	33
II.2.3.1. le temps solaire vrai (T.S.V).....	33
II.2.3.2. Le temps solaire moyen (T.S.M).....	34
II.2.3.3. le temps universel (TU).....	34
II.2.3.4. Le temps légal (TL).....	34
II.2.4. Constante solaire.....	35
II.3. Modèles mathématiques pour l'estimation de l'éclairement solaire.....	35
II.3.1. Modèle de R. Sun.....	35
II.3.2. Modèle de Klucher.....	36
II.3.3. Modèle de Capderou.....	37
II.3.4. Modèle de Jordan.....	38
II.3.5. Méthode Semi-Empirique de Perrin Brichambaut.....	40
II.3.6. Modèle de Hay-Davies.....	41
II.3.7. Modèle de Reindl.....	41
II.3.8. Modèle Munner.....	41
II.4. Résultats et discussions.....	42
II.5. Conclusion.....	45

Chapitre III : Panneaux photovoltaïques dans les bâtiments

III.1. Introduction.....	47
III.2. Systèmes photovoltaïque pour l'habitat.....	47
III.2.1. Systèmes autonomes.....	47
III.2.2. Systèmes connectés au réseau.....	48
III.2.3. Composants d'une installation photovoltaïque.....	48

III.2.3.1. La cellule Photovoltaïque.....	49
III. 2.3.2. Modélisation de la cellule	51
III.2.3.3. Module photovoltaïque.....	54
III.2.3.4. Effet de la variation d'éclairement et de la température.....	54
III. 2.4. Dimensionnement du système photovoltaïque.....	56
III.2.4.1. Besoins en énergie électrique.....	56
III.2.4.2. Energie électrique fournie par le générateur photovoltaïque.....	56
III.2.4.3. Dimensionnement du système de stockage d'énergie	57
III.2.4.4. Dimensionnement du régulateur photovoltaïque.....	58
III.2.4.5. Principe du choix de l'onduleur	58
III.2.4.6. Choix de la tension du réseau.....	59
III.3. Intégration des panneaux PV au bâtiment.....	59
III.3.1. En toiture.....	59
III.3.1.1. Surimposition en toiture.....	59
III.3.1.2. Intégration en toiture.....	59
III.3.2. En toit terrasse.....	60
III.3.2.1. Membranes d'étanchéité photovoltaïque.....	60
III.3.2.2. Surimposition en toit terrasse.....	60
III.3.2.3. Garde-corps de terrasse.....	60
III.3.3. Autres implantations.....	60
III.3.3.1. Garde-corps de balcon.....	60
III.3.3.2. Brise soleil.....	61
III.3.3.3. Bardage.....	61
III.3.3.4. Verrière et façade vitré.....	61
III.4. Principes de l'autoconsommation.....	61
III.4.1. Vente totale.....	62
III.4.2. Vente Excédentaire.....	62
III.4.3. Autoconsommation totale sans stockage.....	62
III.4.4. Autoconsommation totale avec stockage partiel.....	63
III.4.5. Autonomie.....	63
III.5. Optimisation d'un module photovoltaïque.....	63
III.5.1. Méthode d'optimisation de colonie de fourmis(OCF).....	63
III.5.1.1. Algorithme de calcul de la méthode OCF.....	65
III.6. Résultats et discussions.....	66

Chapitre IV : Matériaux à changement de phase

IV.1.Introduction.....	72
IV.2.Stockage de l'énergie thermique.....	72
IV.2.1.Stockage par chaleur sensible.....	73
IV.2.2.Stockage par chaleur latente.....	74
IV.3.Matériaux à Changement de Phase (MCP).....	74
IV.4.Application des MCP dans les bâtiments.....	76
IV. 4.1. Intégration des MCP dans les parois	78
IV.4.2. Murs trombes à base de MCP.....	81
IV.4.3. Intégration des MCP dans les plafonds	82
IV.4.4. Les MCP intégrés à la toiture.....	84
IV.4.5. Intégration des MCP dans les fenêtres	85
IV.4.6. Intégration des MCP dans les rideaux	86
IV.4.7. Protections solaires avec MCP.....	88
IV.4.8. Refroidissement des cellules photovoltaïques par MCP.....	88
IV.5.Cnclusion.....	89

Chapitre V : Modélisation et simulation d'une toiture PVT avec intégration de MCP

V. 1.Introduction.....	91
V.2. Méthodes numériques.....	91
V.2.1. La méthode enthalpique.....	91
V.2.2. La méthode de la capacité thermique apparente.....	94
V.2.3. Comparaison entre les deux méthodes.....	96
V.3. Problème de Stefan en 1D.....	97
V.4. Problème de Stefan en 2D.....	99
V.5. Modélisation et simulation d'une toiture photovoltaïque avec MCP (PVT MCP).....	102
V.5.1. Description du modèle numérique.....	102
V.5.2. Modélisation du panneau solaire hybride (PVT).....	104
V.5.2. Validation du modèle numérique.....	108
V.5.3. Conditions aux limites de la toiture	109
V.5.3.1. La température extérieure.....	109

V.5.3.2. Modélisation des échanges convectifs d'une toiture (PVT-MCP).....	110
V.5.3.2.1. Transfert convectif à l'intérieur du bâtiment.....	110
V.5.3.2.2. Transfert convectif à l'extérieur du bâtiment.....	110
V.5.3.2.3. Modèle convectif de la littérature.....	111
V.5.4. Résultats et interprétations.....	112
V.5.4.1. La température de panneau MCP.....	112
V.5.4.2. Température de la toiture (PVT-MCP).....	114
V.6.Conclusion.....	115
<i>Conclusion générale</i>	118
<i>Références bibliographiques</i>	121

Liste des figures

<i>figure N°</i>	<i>Titre</i>	<i>Page</i>
I.1	Chaîne énergétique pour la production de la chaleur.	06
I.2	Production mondiale d'énergie primaire en 2017.	07
I.3	Consommation énergétique mondiale en TWh de 1965 à 2016.	08
I.4	Structure de la production d'énergie finale par produit en Algérie pour l'année 2017 .	09
I.5	Consommation énergétique finale par secteur en Algérie pour l'année 2017.	09
I.6	Répartition de la consommation du secteur résidentiel par types d'énergie pour l'année 2014.	10
I.7	Diagnostique énergétique et environnemental du secteur du bâtiment.	11
I.8	Bureaux SD Worx.	14
I.9	Bureaux DB-Netz AG.	15
I.10	Quartier Kronsberg de Hanovre (Allemagne) étudié dans le projet CEPHEUS.	18
I.11	Façade sud du bâtiment "Wohnen & Arbeiten".	19
I.12	Bureaux ChristophorusHaus.	20
I.13	Bureaux PassivSolarHaus.	20
I.14	Bâtiment de bureaux Energon.	21
I.15	La maison Hölken.	22
I.16	La maison de Fellbach.	23
I.17	La maison ZEN .	24
I.18	Bâtiments à énergie positive de Freiburg.	24
I.19	Différents scénarios de ventilation d'une façade double peau.	26
I.20	Ventilation et récupération d'énergie pour une façade double peau.	26

II.1	Mouvement de la terre autour du soleil.	31
II.2	Coordonnées horaires.	32
II.3	Coordonnées horizontales.	33
II.4	Le coefficient de détermination.	43
II.5	L'erreur quadratique moyenne (RMSE).	44
II.6	Comparaison entre les résultats obtenus par le modèle de Munner et les données expérimentales de l'éclairement global.	44
III.1	Schéma de principe d'un système PV autonome.	47
III.2	Schéma de principe d'un système PV connecté au réseau.	48
III.3	Quelques types de panneaux photovoltaïques.	49
III.4	Schéma descriptif d'une cellule photovoltaïque.	49
III.5	Évolution des records de rendement de chaque filière de cellules photovoltaïques.	50
III.6	Caractéristiques $I=f(V)$ sous obscurité et sous éclairement d'une cellule photovoltaïque.	51
III.7	Modélisation double diodes d'une cellule PV.	53
III.8	Influence de l'éclairement sur I-V et P-V.	55
III.9	Influence de la température sur I-V et P-V.	55
III.10	Le montage en surimposition.	59
III.11	Intégration en toiture.	59
III.12	Membranes d'étanchéité PV.	60
III.13	Surimposition en toit terrasse.	60
III.14	Garde-corps de terrasse.	60
III.15	Garde-corps de balcon.	60
III.16	Brise soleil.	61
III.17	Bardage.	61
III.18	Verrière et façade vitré.	61
III.19	Vente totale.	62
III.20	Vente Excédentaire.	62
III.21	Autoconsommation totale sans stockage.	62
III.22	Autoconsommation totale avec stockage partiel.	63
III.23	Angle d'inclinaison optimal annuel (modèle de Munner).	67

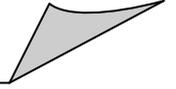
III.24	Irradiation mensuelle reçue sur les plans horizontal et incliné de manière optimale (modèle de Munner).	67
III.25	Irradiation horaire reçue sur un plan incliné d'un angle optimal de 32° (modèle de Munner) pour chaque mois de l'année 2015.	68
III.26	Irradiation globale reçue sur la surface du module PV au cours de l'année.	69
III.27	Production d'électricité moyenne mensuelle.	70
IV.1	Principe de fonctionnement des matériaux à changements de phase.	75
IV.2	Classification des matériaux à changement de phase.	75
IV.3	Quelques dispositions de MCP dans le bâtiment.	76
IV.4	Différents modes d'utilisation des MCP dans le bâtiment.	77
IV.5	Intégration des MCP dans les parois.	78
IV.6	Configuration d'un modèle de mur Trombe MCP.	81
IV.7	Exemple d'intégration des MCP aux plafonds.	83
IV.8	Toiture avec MCP.	84
IV.9	Fenêtre GlassX.	86
IV.10	Rideaux à MCP.	87
V.1	Evolutions de la capacité thermique en fonction de la température.	96
V.2	Géométrie pour un problème de la solidification d'une seule phase.	97
V.3	Modes de transfert de chaleur dans la toiture PVT-MCP.	103
V.4	Température du fluide dans l'échangeur.	104
V.5	Flux et résistances thermiques à travers les différentes couches du capteur .	105
V.6	Evolution temporelle de la température.	109
V.7	Evolution mensuelle de la température Ghardaia (Algérie).	109
V.8	Evolution de la température du MCP à t=5min.	112
V.9	Evolution de la température du MCP à t=10min.	113
V.10	Evolution de la température du MCP à t=15min.	113

V.11	Evolution temporelle de la vitesse de l'interface solide-liquide.	114
V.12	Profil temporel de température de la toiture de l'extérieur vers l'intérieur (Ghardaia -Algérie).	114

Liste des tableaux

<i>Tableau N°</i>	<i>Titre</i>	<i>Page</i>
II.1	Coefficients de correction adimensionnels	39
II.2	Valeurs de l'albédo du sol " ρ "	40
II.3	Paramètre décrivant l'état de l'atmosphère.	40
II.4	Interpolations polynomiales des données expérimentales de l'éclairement solaire global pour un ciel clair.	42
III.1	Coefficients de la température.	57
III.2	Relation tension – puissance.	59
V.1	Propriétés thermo physiques du panneau PVT.	106
V.2	Propriétés thermodynamiques du panneau MCP.	107
V.3	Propriétés thermodynamiques du Placoplatre.	107
V.4	Propriétés thermo physiques de l'air.	108

Introduction générale



La demande mondiale d'énergie primaire a explosé en raison de l'augmentation exponentielle de la population et de l'industrialisation [1]. Plus d'un tiers de la demande énergétique dans le monde est utilisée dans le secteur résidentiel [2]. La consommation d'énergie dans le monde par les équipements de CVC (chauffage, ventilation et climatisation) dans les bâtiments représente 16 à 50% de la consommation totale d'énergie [3].

En Algérie, l'analyse de l'utilisation finale de l'énergie par secteur d'activité, démontre clairement que le secteur résidentiel se place au second rang, avec une consommation énergétique de l'ordre de 41% de l'énergie finale nationale [4]. Ceci est dû non seulement à l'accroissement du parc immobilier, estimé à 6,5 millions d'unités, dont 56,1 % de maisons individuelles et 43,9 % de logements collectifs mais également à l'amélioration des conditions de confort (micro-informatique, climatisation etc.).

Cette consommation d'énergie qui est basée essentiellement sur l'utilisation des produits pétroliers est responsable d'importantes émissions de gaz à effet de serre (31%).

Il faut noter que cette situation risque de s'aggraver du fait que la demande de logements en Algérie ne cesse d'augmenter. En effet au cours des dernières années, les autorités algériennes ont fait du développement de l'habitat une de leurs priorités en lançant un vaste programme de construction en 2005, avec près d'un million de logements dont 450000 unités consacrées aux logements dans les zones rurales afin de maintenir ces populations en place et d'encourager leur retour des zones urbaines, la construction de deux millions de logements dont 700000 logements ruraux entre 2010-2014, et un programme qui prévoit la construction de 1,6 million de logements dont 400000 pour les zones rurales, entre 2015-2019. Cependant, la construction de toutes ces maisons dont le niveau de performance énergétique est médiocre, entraînera sûrement une augmentation significative de la consommation d'énergie [5].

C'est dans ce cadre que l'Algérie a entrepris plusieurs démarches d'économie d'énergie dans le secteur de bâtiment, parmi lesquelles l'adoption d'un programme ECO-BAT, proposé par l'APRUE, qui vise la réalisation de 600 logement à haute performance énergétique basés sur les techniques de l'isolation thermique, le développement des chauffe-eaux solaires, l'installation des lampes à basse consommation et la réduction du recours à la lumière artificielle. A l'horizon 2030, ce programme devrait permettre à l'Algérie d'économiser 63 millions de tonnes équivalent pétrole (Tep), représentant un gain financier de 42 milliards de dollars.

Ce programme, lancé en 2016, se déploie autour des secteurs de l'industrie, du transport et de l'habitat. Dans le secteur de bâtiment, le programme prévoit l'isolation thermique de 100.000 logements par an, avec un engagement financier de l'état par prendre en charge 80% des surcoûts liés à cette opération [6].

En parallèle, l'équipe du CDER a développé une application baptisée RETA (Réglementation Thermique Algérienne). L'application est un logiciel libre d'accès qui se présente sous forme d'interface graphique. Cette dernière, qui se veut être un outil d'aide pour les intervenants dans le domaine de la construction, présente à l'utilisateur une interface ergonomique et facile d'utilisation lui permettant de décrire les différents composants d'un bâtiment et d'effectuer les calculs thermiques nécessaires afin de vérifier la conformité du projet vis-à-vis de la réglementation thermique algérienne (DTR C3-2 et DTR C3-4) [7].

Dans le mix énergétique national, l'intégration et le développement des énergies renouvelables constituent un enjeu majeur dans les perspectives, ces énergies se placent au cœur des politiques énergétique et économique menées par l'Algérie dans le programme 2011-2030, notamment le développement du photovoltaïque à grande échelle [7].

C'est dans cette démarche que s'inscrit notre travail de thèse, dont l'objectif est l'intégration des énergies renouvelables (panneaux photovoltaïques) au bâtiment d'une part et l'amélioration de l'isolation des parois en incorporant des matériaux à changement de phase (MCP) à l'enveloppe afin de réduire les apports calorifiques.

Le manuscrit est organisé en cinq chapitres, précède par une introduction et complété par une conclusion générale.

Le premier chapitre est réservé à une synthèse bibliographique sur les types et les classifications des habitats à efficacité énergétique. Pour ce faire une littérature riche portant sur plusieurs références bibliographiques a été consultée.

Le deuxième chapitre se focalise sur des notions mathématiques utile pour repérer la position du soleil à un moment donné de l'année et pour déterminer les grandeurs astronomiques. On s'intéresse plus particulièrement au choix d'un modèle empirique efficace pour l'estimation de l'éclairement incident sur le toit d'un habitat.

Le troisième chapitre présente le système photovoltaïque dans l'habitat pour l'amélioration de l'efficacité énergétique. Une étude théorique des composants d'un système

photovoltaïque pour l'habitat (systèmes autonome et connecté au réseau) est menée. La première partie de ce chapitre est consacrée à la modélisation et au dimensionnement des modules PV avec différents types d'intégration, pour l'utilisation dans l'habitat. Dans la deuxième partie, le lecteur trouvera l'optimisation des quelques paramètres de modules PV qui peuvent améliorer leur performance électrique. La méthode d'optimisation par colonies de fourmis (OCF) pour l'optimisation de l'angle d'incidence du capteur PV est également exposée.

Dans l'objectif d'intégrer des panneaux MCP dans l'enveloppe de l'habitat, le quatrième chapitre est consacrée à une synthèse bibliographique sur ces matériaux afin de choisir ceux qui nous semblent les plus adéquats. Les différents types de stockage de l'énergie thermique existants, les diverses familles de matériaux à changement de phase (MCP) ainsi que leurs applications notamment dans le bâtiment sont successivement présentés.

Le cinquième chapitre est dédié aux méthodes théoriques permettant de calculer les températures à l'intérieur d'une toiture photovoltaïque avec MCP (PVT-MCP) ainsi que les flux transférés. Ce sont essentiellement les méthodes de résolution de l'équation de conduction de la chaleur dans un matériau qui change d'état par les méthodes numériques de la capacité apparente, enthalpique et variable de pas de temps. Ces équations nécessitant la connaissance des propriétés physiques, la détermination de ces dernières par le calcul est également présentée. La modélisation de (PVT-MCP) et la simulation numérique associée, le programme de simulation que nous avons élaboré à l'aide du logiciel MATLAB et les résultats obtenus font également l'objet de ce chapitre.

Chapitre I

Les habitats à basse consommation d'énergie

I.1. Introduction

Actuellement dans le monde, les bâtiments performants, appelés également "bâtiments basse énergie" ou "bâtiments basse consommation" se comptent par centaines de milliers. Ils se caractérisent principalement par une conception architecturale bioclimatique, une bonne isolation thermique, des fenêtres performantes, un système de ventilation double flux avec récupération de chaleur sur l'air extrait, parfois associé à un puits climatique, et un système de génération performant (pompe à chaleur, chaudière bois, chaudière à condensation...). De plus, une attention particulière est portée à la infiltration à l'air et aux ponts thermiques. Ajouté à cela, le recours à des sources d'énergies renouvelables (solaire, géothermie, biomasse etc.) est souvent envisagé.

I.2. Situation énergétique et environnementale

L'énergie consommée est le résultat d'un long processus, appelé chaîne énergétique (figure I.1), dans laquelle une énergie primaire (pétrole brut, buche de bois...) subit des transformations physico-chimiques pour produire une énergie dite secondaire. Facilement transportable, cette dernière est acheminée vers les foyers de consommation où l'énergie finale reçue est transformée en énergie utile [1].

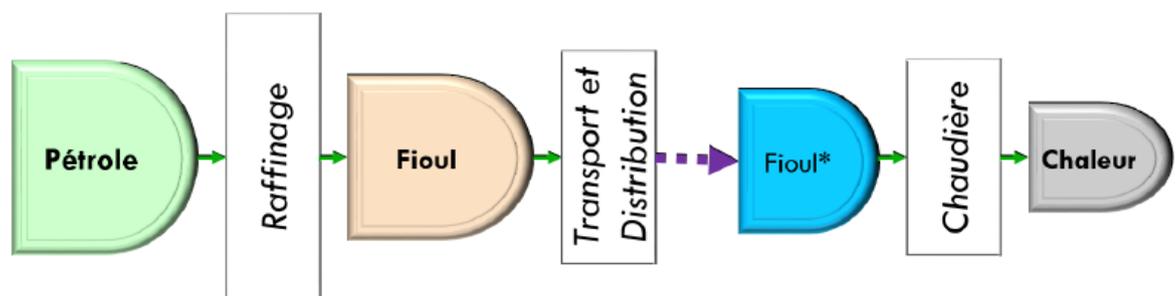


Fig. I.1. Chaîne énergétique pour la production de la chaleur [2].

Si cette consommation énergétique contribue significativement à améliorer notre qualité de vie, il n'en demeure pas moins que l'utilisation des sources d'énergie fossiles représente de plus en plus une menace pour l'environnement. En effet, les émissions des gaz à effet de serre (GES) anthropiques, dont majoritairement les dioxydes de carbone et d'azote (CO_2 , NO_2) viennent s'ajouter aux gaz à effet de serre naturellement présents dans l'atmosphère, accentuant ainsi le phénomène de l'effet de serre qui est à l'origine du changement climatique [2].

I.2.1. Sur le plan mondial

Selon l'Agence Internationale de l'Energie (AIE), la production mondiale d'énergie est passée de 6106 Mtep en 1973 à 13371 Mtep en 2012, soit le double en 40 ans [2,3].

Selon BP (British Petroleum), elle a atteint près de 13511 Mtep en 2017, soit une augmentation de 16.6% par rapport à 2007. Cette production d'énergie est composée de 32% de pétrole, 27.9% de charbon, 23% de gaz naturel, 4.4% de nucléaire et 11% d'énergies renouvelables (figure I.2) [4].

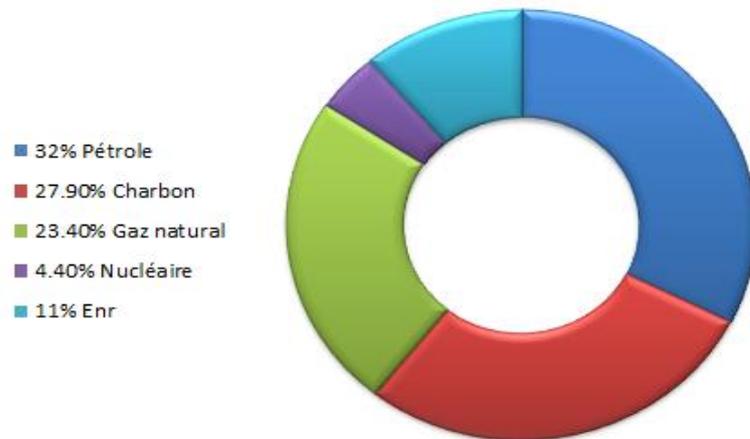


Fig. I.2. Production mondiale d'énergie primaire en 2017[4].

Concernant la répartition de la consommation d'énergie primaire, elle serait selon l'Agence internationale de l'énergie largement dominée, depuis plusieurs années, par les combustibles fossiles (pétrole, charbon et gaz naturel), avec une proportion de 86.7% en 1973 et près de 81.7% en 2012 (figure I.3) [3].

Pour la consommation finale énergétique mondiale, elle s'élevait en 2016, à 9555 Mtep, dont 19% sous forme d'électricité. La part des énergies renouvelables (EnR) est passée de 15.5% en 1990 à 16.4% en 2016.

La répartition de la consommation d'énergie par secteur est de 29 % pour l'industrie, de même que pour les transports, de 22 %, pour le résidentiel, de 8 % pour le tertiaire, de 2% pour l'agriculture et la pêche et 9 % pour les usages non énergétiques (chimie, etc.).

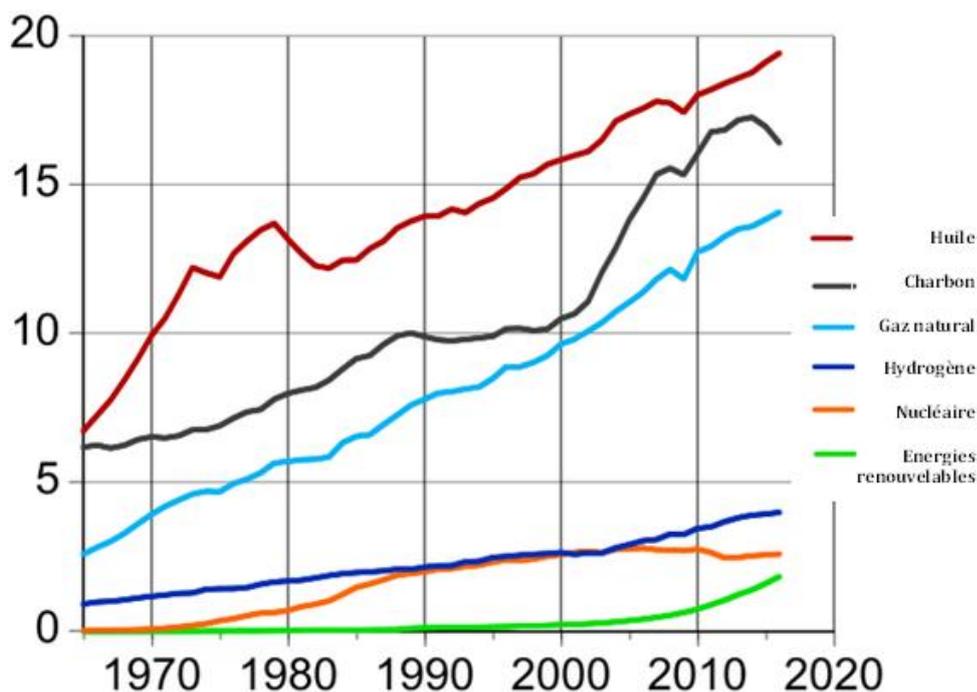


Fig. I.3. Consommation énergétique mondiale en TWh de 1965 à 2016 [3].

Les émissions de CO₂ anthropiques, estimées en 2016 par l'AIE, s'élèvent à 32316 Mégatonnes (Mt), en progression de 109% depuis 1973. Dans le monde, les émissions de CO₂ par habitat en 2016 ont été estimées à 4.35 tonnes.

Actuellement, la consommation énergétique mondiale est en grande partie responsable du changement climatique. Aussi, d'après un scénario de l'AIE, ce changement devrait perdurer puisque les émissions des gaz à effet de serre continueraient à augmenter jusqu'à l'horizon 2040, provoquant une hausse de la température moyenne mondiale, de 3.6 °C, si des mesures sérieuses ne sont pas prises dès à présent. C'est l'un des grands enjeux de la conférence COP 21 sur le climat, qui s'est tenue à Paris du 30 novembre au 11 décembre 2015 [2,3].

I.2.2. En Algérie

Il est connu que, pour notre pays, les hydrocarbures et surtout le gaz naturel ont déjà affirmé leur primauté comme matière première pour la pétrochimie et la thermoélectricité, et comme source d'énergie essentielle pour le transport, l'industrie et les besoins ménagers.

L'Algérie doit faire face aux conséquences de l'utilisation insouciante de ces énergies, et à leur pénurie prévisible. La consommation d'énergie finale par produit en 2017 est, tel que montrée par la figure I.4, basée en majorité sur l'utilisation du gaz naturel [5,6].

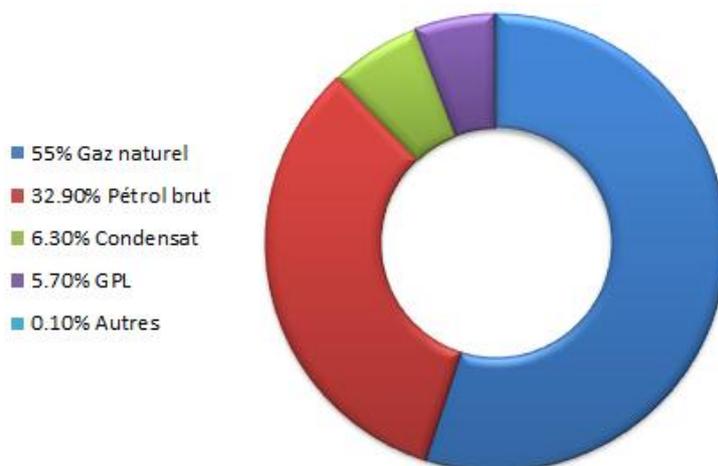


Fig. I.4. Structure de la production d'énergie finale par produit en Algérie pour l'année 2017 [5,6].

Par ailleurs l'examen de la figure I.5 représentant l'utilisation finale de l'énergie par secteur d'activité montre incontestablement la prépondérance du secteur "ménages et autres" qui représente 44.4 % de la consommation totale d'énergie en 2017. Ce secteur a connu une hausse de (+ 6.6 %) par rapport à l'année 2016 [5,6].

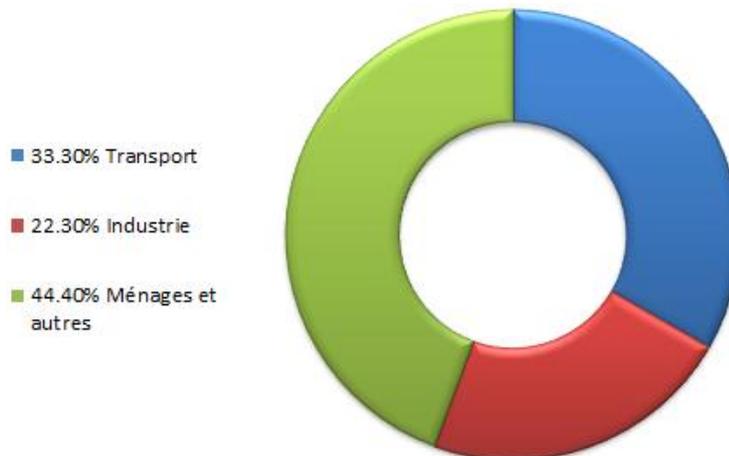


Fig. I.5. Consommation énergétique finale par secteur en Algérie pour l'année 2017 [5,6].

Ceci est dû à l'accroissement du parc immobilier, et à de nouveaux besoins à forte consommation tel que la climatisation. Les principaux types d'énergie utilisée dans le secteur résidentiel sont illustrés par la figure I.6.



Fig. I.6. Répartition de la consommation du secteur résidentiel par type d'énergie pour l'année 2014 [7].

Il est aisé de remarquer la prépondérance des produits gazeux, avec 63 %, suivis des produits pétroliers avec 20 %, puis en dernier lieu l'électricité avec un taux de 17 % de la consommation énergétique totale. Ce qui se traduit par un secteur résidentiel en Algérie totalement dépendant des produits gazeux et de ce fait responsable en grande partie des émissions de gaz à effet de serre (31 %). Il est important de souligner que du fait que la demande de logements en Algérie ne cesse d'augmenter, ce secteur est appelé à rester dans l'avenir largement responsable de l'accroissement de la demande énergétique, ainsi que des rejets de CO₂.

L'Algérie, doit alors faire face non seulement à la pénurie prévisible à moyen ou long termes, des sources d'énergie fossile mais et surtout à leur impact néfaste imminent sur l'environnement.

I.3. Solutions de maîtrise de l'énergie

Les consommations énergétiques et les émissions de GES ayant tendance à une croissance exponentielle, il faut donc dès maintenant faire face à deux enjeux majeurs, la sécurité énergétique et le changement climatique. Pour ce faire, les autorités compétentes mettent en place des politiques de maîtrise d'énergie, par la promotion d'une consommation d'énergie efficace et à faible impact environnemental.

En Algérie, plusieurs études ont conclu que le secteur du bâtiment premier consommateur d'énergie et grand pollueur, pourrait représenter le plus gros gisement d'économie d'énergie et de réduction des émissions de gaz à effet de serre et autres polluants. Il est donc impératif de porter une attention particulière à ce secteur.

Pour cela, il faut en premier lieu établir un diagnostic des consommations d'énergie et des émissions de dioxyde de carbone dans le bâtiment. Cette première opération a montré que 44.4% (en 2017) d'énergie finale consommés par le secteur du bâtiment ont servi à satisfaire principalement les besoins thermiques et électriques (figure I.7) et générés près de 25% de CO₂ à cause de la combustion de fioul et de gaz naturel pour le chauffage et l'eau chaude (ECS) [5].

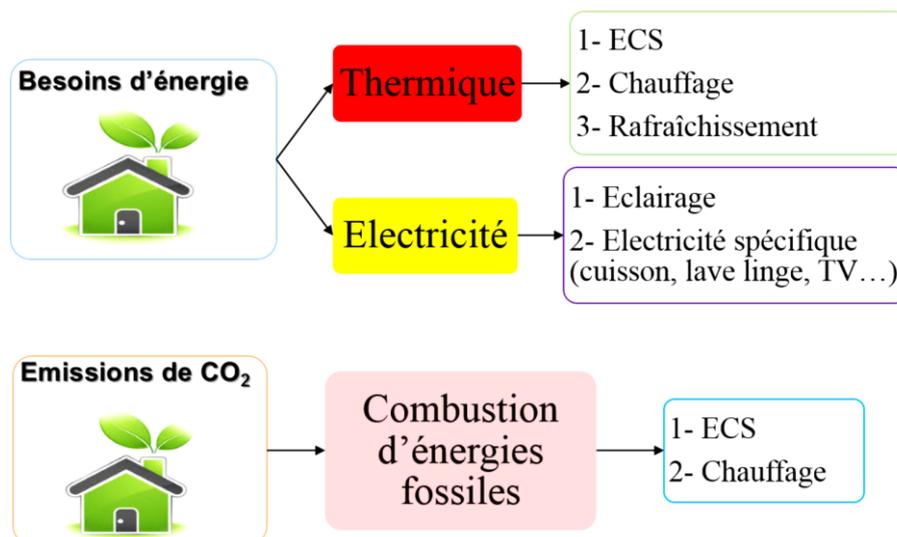


Fig. I.7. *Diagnostics énergétique et environnemental du secteur du bâtiment* [2].

En second lieu, il s'agira de maîtriser la consommation énergétique de ce secteur et ce à travers [2]:

- L'amélioration des performances de l'enveloppe du bâti (isolation thermique).
- L'utilisation d'équipements performants (pompe à chaleur, ventilation équipé d'un récupérateur d'énergie, plancher chauffant, radiateur basse température, système d'éclairage basse consommation ...).
- L'utilisation des énergies renouvelables (géothermie, solaire, biomasse) pour la production d'énergie thermique et (solaire, éolien, hydraulique) pour l'énergie électrique.

Certes, les solutions techniques pour réduire la consommation énergétique des ménages sont fort appréciables, mais la substitution des énergies conventionnelles par les énergies renouvelables reste encore limitée, et seule une partie des besoins est satisfaite par cette voie.

I.4. Energie et développement durable

Le concept de développement durable est un modèle qui vise la satisfaction des besoins fondamentaux de l'homme et la gestion rationnelle et efficace des ressources, tout en préservant la qualité environnementale. Ce concept, appliqué à la conception architecturale, à la construction, et à l'exploitation des bâtiments, permet d'augmenter le bien-être des populations, de réduire la facture énergétique et de garantir un environnement sain.

Un développement énergétique durable implique trois priorités:

- Mener une politique active pour une économie d'énergie.
- Développer l'utilisation des énergies renouvelables.
- Rechercher de nouvelles sources d'énergie permettant une plus grande efficacité et une autosuffisance énergétique du pays.

Partant des principes du développement durable, l'architecture devra assurer la conciliation de trois volets différents (économie, écologie et social). Le bâtiment devra abriter l'utilisateur et assurer au mieux son confort, avec un impact sur l'environnement extérieur minimisé. On parle alors de "habitat durable" ou "bâtiment vert" ou encore "bâtiment à haute qualité environnementale". L'aspect énergétique demeure ainsi une préoccupation majeure, ce qui nous amène à nous intéresser au bâtiment performant, dit encore bâtiment à bas profil énergétique et qui repose sur deux grands leviers :

- L'efficacité énergétique, qui est réalisée à travers le choix des matériaux, l'inertie de l'enveloppe, l'isolation et l'architecture bioclimatique.
- Le recours aux énergies renouvelables.

I.4.1. Efficacité énergétique dans les bâtiments

L'efficacité énergétique se traduit par la réduction de la consommation d'énergie sans toutefois provoquer une diminution du niveau du confort ou de la qualité de service dans les bâtiments.

L'orientation, la compacité et la forme du bâtiment, ont des conséquences significatives sur sa performance énergétique. Un mauvais choix peut entraîner des défaillances imprévisibles dont l'impact sur la consommation énergétique du bâtiment n'est souvent découvert que lors de son exploitation.

Suivant leurs niveaux de performance énergétique, les bâtiments sont classés en trois familles, bâtiments performants, bâtiments très performants et bâtiments zéro énergie ou à énergie positive [8].

I.4.2. Bâtiment performant "basse énergie"

Les bâtiments performants, couramment appelés bâtiments basse énergie (à basse consommation), existent en plusieurs milliers d'exemplaires. Ils se distinguent principalement par une architecture bioclimatique, une bonne isolation thermique, des fenêtres performantes, un système de ventilation double flux avec récupération de chaleur sur l'air extrait, parfois associé à un puits climatique, un système de génération performant (pompe à chaleur, chaudière bois, chaudière à condensation etc.). Une attention particulière est accordée à la infiltration à l'air et aux ponts thermiques. De plus le recours à des sources d'énergies renouvelables, (solaire, éolien, géothermie, biomasse) est souvent privilégié.

Les opérations les plus connues de ce type de bâtiments sont les labels Suisses MINERGIE® (label d'efficacité énergétique et de confort) et MINERGIE-ECO® (un complément au standard MINERGIE®) qui prend en compte l'aspect écologique des constructions. Les bâtiments certifiés MINERGIE® et MINERGIEECO® existent par milliers en Suisse [8,9].

a) Les labels MINERGIE® et MINERGIE-ECO®

- **MINERGIE®** est un label de qualité en termes de performance énergétique et de confort thermique destiné aux bâtiments neufs et rénovés en Suisse. Ce standard définit cinq exigences pour un bâtiment concernant l'enveloppe, le système de ventilation, les

consommations annuelles d'énergie et le surcoût d'investissement qui ne doit pas dépasser 10%. Il existe éventuellement des exigences supplémentaires, en fonction de la catégorie du bâtiment, concernant l'éclairage et la production de froid.

Il faut noter que pour produire de la chaleur, cinq systèmes sont recommandés [8,9] :

- Pompe à chaleur avec sonde géothermique.
- Chauffage au bois + capteurs solaires.
- Chauffage au bois automatique.
- Récupération des rejets de chaleur.
- Pompe à chaleur air / eau.

- **MINERGIE-ECO®** Il s'agit d'un complément au standard MINERGIE®. En plus des exigences d'efficacité énergétique et de confort thermique, MINERGIE-ECO® impose des modes de construction sains et écologiques.

b) Exemples de réalisations de bâtiments performants

On recense à travers le monde de nombreuses réalisations de bâtiments performants, nous citerons à titre d'exemple :

- **SD Worx** qui est un immeuble de bureaux R+2 de 1200m² de surface (figure I.8), construit entre 2001 et 2002 dans la ville de Kortrijk en Belgique [8,10].



Figure. I.8. Bureaux SD Worx [8].

L'isolation thermique du bâtiment a été conçue pour réduire les déperditions par transmission. Ces dernières sont minimisées par ventilation en préchauffant l'air neuf à travers une installation de puits climatique (2 tubes de 40 m de longueur), couplée à un système de ventilation double flux avec récupération de chaleur sur l'air extrait.

Le suivi, effectué entre 2002 et 2003, a montré que la consommation d'énergie annuelle pour le chauffage est de 62 kWh/m^2 [8,10].

Le confort thermique durant la saison chaude est assuré par des solutions passives:

- Refroidissement à l'aide d'une ventilation nocturne.
- Zones de circulation côté sud (les bureaux sont du côté nord du bâtiment).
- Puits climatiques pour le rafraîchissement de l'air neuf.
- Gains internes dus aux équipements bureautiques et à l'installation d'éclairage artificiel réduit (puissance d'éclairage installée égale à $9,5 \text{ W/m}^2$).
- Protections solaires pour les fenêtres de la façade sud.

• **SolarBau** est un projet de recherche Allemand visant à promouvoir les économies d'énergie et l'utilisation de l'énergie solaire. Dans le cadre de ce projet, un grand bâtiment urbain à plusieurs étages de bureaux, appelé "DBNetz AG" avec pour objectif une consommation totale annuelle d'énergie inférieure à 100 kWh/m^2 a été réalisé dans la ville de Hamm en Allemagne (figure I.9) [11].



Fig. I.9. Bureaux DB-Netz AG [11]

La surface utile du bâtiment est de 5974 m^2 . L'air est renouvelé à l'aide d'un système de ventilation hybride. La réduction des besoins en chauffage est assurée grâce à une isolation thermique performante et à la récupération des apports solaires. Le système de chauffage est une chaudière à gaz à condensation alimentant une installation de plancher chauffant.

De plus et afin de réduire simultanément les consommations d'électricité et les apports internes en saison chaude, l'éclairage naturel est privilégié.

En été, le confort thermique est assuré par des solutions passives, (installation de puits climatique, ventilation naturelle nocturne pour refroidir la structure du bâtiment, protections solaires).

Le suivi du bâtiment entre 2001 et 2002, a révélé les performances suivantes [8] :

- Le pourcentage du nombre d'heures de travail pour lesquelles la température opérative est supérieure à 25°C est de 10%.
- La consommation totale annuelle d'énergie finale pour le chauffage est de 60,6 kWh/m².
- La consommation annuelle d'électricité pour les différents usages est de 62,1 kWh/m².

On peut ainsi noter que la consommation totale d'énergie est égale 122,7 kWh/m². Il apparaît donc que l'objectif des 100 kWh/m²an visé par ce type bâtiment, n'est pas atteint.

I.4.3. Bâtiment très performant "très basse énergie"

Ce bâtiment est un très faible consommateur d'énergie, du fait qu'il ne nécessite pas de systèmes de chauffage ou de rafraîchissement actifs. Les apports passifs solaires et internes et les systèmes de ventilation suffisent à maintenir le confort de l'ambiance intérieure tout au long de l'année. Il s'agit en général de bâtiment passif dont le concept a été défini par le Dr. Wolfgang Feist de l'institut de recherche allemand Passivhaus. C'est un bâtiment dans lequel l'ambiance intérieure est confortable aussi bien en hiver qu'en été et cela, sans devoir faire appel à aucun système conventionnel de régulation de température, ni de chauffage, ni de refroidissement. Ceci peut être atteint grâce à une grande isolation thermique, une forte réduction des ponts thermiques et une excellente étanchéité à l'air. De plus, les déperditions par ventilation sont réduites à travers un système de ventilation double flux avec récupération de chaleur sur l'air extrait. Des labels de bâtiments passifs ont été créés en Allemagne (Passivhaus) et en Suisse (MINERGIE-P[®]). Le label Allemand dénommé Passivhaus est connu également sous les noms de Klimahaus en Autriche, CasaClima en Italie et Passiefhuis en Belgique [12-14].

a) Les labels MINERGIE-P[®] et Passivhaus

- **Le label MINERGIE-P[®]** est un label de la marque MINERGIE[®] qui correspond au bâtiment passif. Les exigences de ce standard en termes de consommation d'énergie sont uniquement plus basses que celles du MINERGIE[®]. Il est destiné aux habitats collectifs, individuels et administrations.

MINERGIE-P[®] impose les exigences suivantes [8] :

- Une étanchéité à l'air du bâtiment pour une différence de pression de 50 Pa qui doit être inférieure ou égale à 0,6 vol/h.
- L'utilisation exclusive des lampes à faible consommation énergétique et d'appareils électroménagers de la classe d'efficacité A.
- Une puissance de chauffage au maximum égale à 10 W/m².
- Pour les bâtiments d'habitation, E_{pond} (l'indice pondéré de dépense d'énergie) doit être inférieur à 30 kWh/m².

- **Le label Passivhaus**

Créé en 1996 par le Dr Wolfgang Feist et délivré par l'institut de recherche allemand Passivhaus, il est destiné aux bâtiments résidentiels et tertiaires. Pour atteindre le standard Passivhaus, il est nécessaire de satisfaire les conditions suivantes:

- Un besoin annuel de chauffage ne dépassant pas les 15 kWh/m².
- Une demande annuelle d'énergie au plus égale à 120 kWh/m²an.

Un bâtiment Passivhaus est, en résumé, la combinaison d'une enveloppe parfaitement adiabatique, une infiltration minimale à l'air, de la récupération d'énergie sur la ventilation et de préchauffage d'air neuf et des sources d'énergies renouvelables [13-15].

b) Exemples de réalisations de bâtiments très performants

Projet européen CEPHEUS

Le projet CEPHEUS, inscrit dans le programme THERMIE de la Commission Européenne, sur la période 1998-2001, a concerné cinq pays européens (Allemagne, Autriche, France, Suède et Suisse) avec au total 221 logements, conçus selon le standard Passivhaus. (figure I.10) [16-18].

Les techniques mises en œuvre dans la majorité de ces logements ont été [18] :

- Une ventilation mécanique contrôlée (VMC), associée à un échangeur de chaleur performant, et de manière optionnelle à un échangeur air-sol, qui a permis de réduire significativement les pertes thermiques par renouvellement d'air.
- Une température intérieure des bâtiments fixée à 20 °C.
- Des déperditions thermiques minimales, conformément aux recommandations du standard Passivhaus et ce, à travers une grande isolation de l'enveloppe.
- Des vitrages performants ($U_w < 0,8 \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$).

- La suppression des ponts thermiques et la réduction au maximum des fuites d'air (infiltrations $< 0,6 \text{ vol.h}^{-1}$ pour une surpression de 50 Pa).

Le projet CEPHEUS a démontré la faisabilité technico-économique des maisons satisfaisant le standard Passivhaus.



Fig. I.10. Quartier Kronsberg de Hanovre (Allemagne) étudié dans le projet CEPHEUS [18].

Bâtiment de Wohnen & Arbeiten

Le bâtiment «Wohnen & Arbeiten» (figure I.11), réalisé en 1999, regroupe 15 logements et 4 bureaux d'une superficie totale de $1\,428 \text{ m}^2$. La conception énergétique de ce bâtiment vise à réduire les besoins de chaleur de 93 %, ceux d'eau chaude sanitaire de 82 % et les besoins d'électricité de 67 %, par rapport à un bâtiment standard [19,20].

Ce bâtiment comprend:

- Une centrale de cogénération au gaz naturel ($12,5 \text{ kWth}$ et $5,5 \text{ kWe}$) avec échangeurs de chaleur sur les gaz d'échappement;
- Un système de ventilation mécanisé centralisé avec échangeur de chaleur sur air vicié, avec un bon rendement (82 %);
- Des protections solaires;
- Des capteurs solaires thermiques ($39,6 \text{ m}^2$) et photovoltaïques (60 m^2 , soit $3,2 \text{ kWc}$) et des équipements économes en énergie et en eau.



Fig. I.11. Façade sud du bâtiment "Wohnen & Arbeiten" [18].

Sur les 28 675 kWh d'électricité consommés sur l'année, 56 % ont été produits dans le bâtiment (46 % par la cogénération et 10 % par les panneaux photovoltaïques). Sur cette même période, les consommations en énergie finale pour le chauffage et l'eau chaude sanitaire se sont élevées respectivement à 15,2 kWh.m⁻² et 16,6 kWh.m⁻². Les objectifs fixés initialement n'ont donc pas été totalement atteints. Les écarts observés s'expliquent par divers problèmes techniques [18].

En effet, bien que 24 % des besoins énergétiques du bâtiment soient fournis par l'énergie solaire, le reste de la consommation (76 %) est satisfait par le gaz naturel et l'électricité du réseau, et de ce fait ce bâtiment ne peut être considéré à très basse énergie.

ChristophorusHaus

Construit en 2003 selon les exigences du standard Passivhaus, ce bâtiment situé en Autriche, regroupe un ensemble de bureaux d'une surface totale de 1550 m² (figure I.12). L'air est utilisé pour le chauffage et le refroidissement du bâtiment qui comprend [8] :

- Une installation de capteur solaire de 6 m² de surface qui couvre 70% des besoins en ECS.
- Une pompe à chaleur réversible couplée à 8 capteurs verticaux enterrés, de 100 m de longueur chacun. La pompe à chaleur possède une puissance nominale pour le chauffage de 43 kW et un COP nominal de 4,03. Néanmoins les capteurs enterrés peuvent refroidir directement le bâtiment sans recourir à la pompe à chaleur. La puissance de refroidissement obtenue est de 25 W/m².
- Un système de ventilation double flux avec récupération de chaleur sur l'air extrait, (l'efficacité de l'échangeur est de 86%.)

- Une installation de capteurs photovoltaïques de 10 kWc de puissance. Cette installation sert à alimenter la pompe à chaleur et le système de ventilation.

Ainsi, les besoins de chauffage sont inférieurs à 15 kWh/m²an, ceux de refroidissement sont inférieurs à 10 kWh/m²an et la consommation d'énergie ne dépasse pas 80 kWh/m²an [8].



Fig. I.12. Bureaux ChristophorusHaus [8].

PassivSolarHaus de Cölbe

Il s'agit d'un immeuble de bureaux de 2180 m² de surface utile, situé à Cölbe en Allemagne (figure I.13). Construit en 1998, ce bâtiment est le premier Passivhaus tertiaire en Europe. Il comprend [8,21]:

- Une pompe à chaleur réversible couplée à 4 capteurs verticaux de 32 m de longueur, enterrés.
- Des capteurs solaires thermiques d'une surface de 65 m².
- Un puits climatique pour le préchauffage de l'air en hiver et le rafraîchissement en été.
- Un ballon de stockage d'eau chaude de 85 m³ à 95°C, pour le chauffage de l'air.
- Un système de ventilation naturelle nocturne.
- Une installation de cogénération (12,5 kW thermique et 5,5 kW électrique).
- Un échangeur à air avec un rendement de 80%.

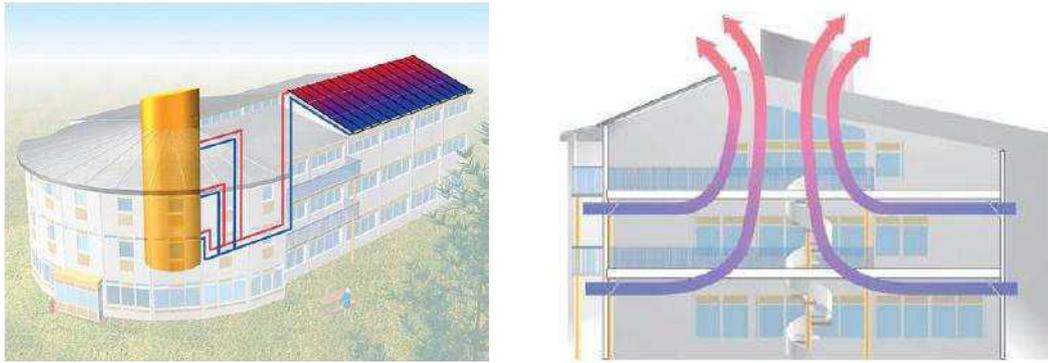


Fig. I.13. Bureaux PassivSolarHaus [21]

✚ Bâtiment de bureaux Energon

Construit à Ulm (Allemagne) en 2002, selon les exigences du label Passivhaus, cet immeuble est composé de bureaux d'une surface globale utile de 7000 m² (figure I. 14).



Fig.I.14. Bâtiment de bureaux Energon [8]

I.4.4. Bâtiments zéro énergie ou à énergie positive

Un bâtiment zéro énergie ou à énergie positive est défini comme étant un bâtiment qui produit autant ou plus d'énergie qu'il en consomme. Ces bâtiments sont la combinaison de bâtiments basse énergie ou passifs, avec des toits solaires photovoltaïques et parfois thermiques.

a) Exemples de réalisations de bâtiments à énergie positive

✚ Maison Hölken

Cette maison solaire autonome de 145 m² de surface chauffée, construite à Fribourg-en-Brigau (Allemagne) en 1992, a été conçue par le Fraunhofer Institut für Solar Energiesysteme (F-ISE) [22].

Elle dispose d'une façade solaire composée de vitrages ($U_w = 0,6 \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$), d'isolants opaques ($U < 0,2 \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$) et d'isolants transparents associés à des protections solaires intégrées (figure I.15) [18,22].

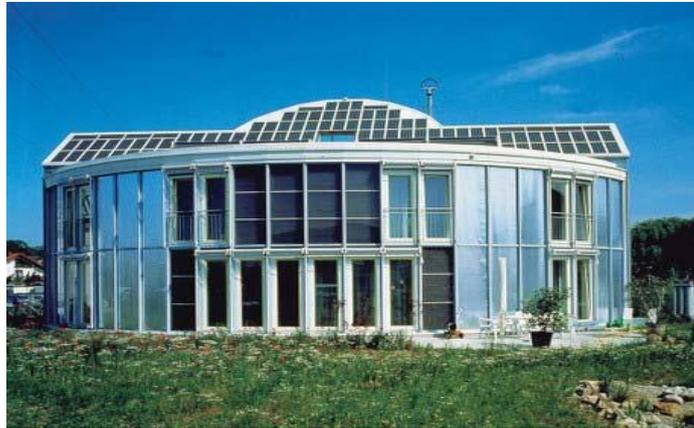


Fig. I.15. La maison Hölken [18]

Les techniques mises en œuvre dans la maison Hölken sont principalement [18]:

- Une toiture photovoltaïque (34 m^2), pour la production d'électricité
- Des capteurs solaires thermiques (12 m^2), pour fournir l'eau chaude sanitaire
- Des appareils électriques économes
- Une gestion et un stockage de l'énergie assurés par une pile à combustible réversible fonctionnant en parallèle;
- Le surplus d'électricité produit par la toiture photovoltaïque sert à l'électrolyse de l'eau;
- Une pile qui convertit l'hydrogène stocké en électricité et en chaleur, (pouvant être également utilisée pour la cuisson), lors de pointes de besoins et/ou en l'absence de soleil.

Les besoins de chauffage de cette maison sont quasiment nuls. Ces techniques permettent de répondre aux besoins d'électricité et de l'eau chaude qui représentent la majeure partie de la consommation.

D'après Goetzberger *et al* (1994), un tel bâtiment autonome, bien que satisfaisant d'un point de vue des performances atteintes, ne peut être développé à grande échelle pour des raisons à la fois techniques et économiques [23].

✚ Maison de Fellbach

Située dans la ville de Fellbach en Allemagne (figure I.16), le principe de cette maison individuelle est de réduire les besoins de chauffage, à environ 11 kWh/m²an, et d'assurer ces besoins à l'aide d'une pompe à chaleur alimentée avec des panneaux photovoltaïques [8,15].

La maison est compacte avec la présence d'une véranda au sud, et une façade nord aveugle.

La production d'énergie électrique photovoltaïque est supérieure aux besoins des équipements et permet d'alimenter tous les usages. Pour le chauffage, la consommation électrique s'élève à 1500 kWh, celle de la production d'ECS à 700 kWh et celle de la ventilation à 600 kWh.



Fig.I.16. La maison de Fellbach [8].

✚ Maison ZEN

Cette maison de 200 m², bâtie à Montagnole (Savoie, France), vise à la fois le bilan d'énergie positive et l'absence d'émission de CO₂. Sa structure en bois massif s'appuie sur une conception bioclimatique (figure I.17) [24].

Les techniques mises en œuvre dans la maison Zen sont [18,24]:

- Une isolation par une couche de liège expansée
- Des fenêtres à triple vitrage et des protections solaires.
- Des équipements très efficaces, une pompe à chaleur sur air extrait, couplée à un échangeur air-sol qui assure le chauffage ou le rafraîchissement par l'air de ventilation et une pompe à chaleur air-eau qui produit l'eau chaude sanitaire. La totalité de l'énergie électrique consommée est produite par la toiture photovoltaïque du bâtiment (13,5 kWc).

Du point de vue de l'analyse quantitative, la production annuelle photovoltaïque prévisionnelle s'élève à 12 000 kWh alors que la consommation électrique ne doit pas dépasser 9 000 kWh, ce qui correspond théoriquement à un bilan largement positif [18].



Fig. I.17. La maison ZEN [24].

Les bâtiments de Freiburg

Il s'agit de maisons solaires bioclimatiques dont la principale caractéristique est de produire plus d'énergie que nécessaire aux occupants. Ces bâtiments sont conçus comme un système préfabriqué modulaire avec bois (figure I.18). Le concept est une amélioration de la maison passive avec de larges baies vitrées au sud qui constituent la principale source de chaleur et assurent l'éclairage des pièces principales, ainsi qu'une toiture photovoltaïque. Les balcons sont en acier galvanisé et partiellement solidaires de la structure pour limiter les ponts thermiques. Le coefficient de transmission des parois opaques est de $0,12 \text{ W/m}^2\text{K}$ et les baies vitrées sont constituées d'un triple vitrage. Les besoins annuels de chauffage varient entre 10 et 15 kWh/m^2 [8,15].



Fig. I.18. Bâtiments à énergie positive de Freiburg [15]

Les déperditions par ventilation sont réduites via un système de ventilation avec récupération de chaleur sur l'air extrait. Une toiture photovoltaïque qui produit entre 3 et 12 kWp suivant la taille du bâtiment, joue également le rôle de brise soleil.

Réalisations de l'architecte Rolf Disch

L'architecte allemand Rolf Disch a lancé plusieurs projets selon le concept de maison à énergie positive. C'est le cas notamment du lotissement solaire Solarsiedlung de Fribourgen-Brisgau. Les 58 maisons à ossature en bois offrent des surfaces habitables comprises entre 75 à 270 m² et présentent des besoins de chauffage, inférieurs à 15 kWh.m⁻². an⁻¹. La toiture photovoltaïque de chaque maison est d'une puissance crête de 3 à 10 kWc. La production électrique est injectée dans le réseau public [18].

I.5. Les technologies retenues

L'étude bibliographique menée sur les bâtiments à basse consommation d'énergie permet de noter que le principe est basé sur les mêmes critères, à savoir, la réduction des besoins énergétiques, et la production du complément d'énergie de façon efficace tout en utilisant des sources d'énergies renouvelables. Les principales technologies utilisées dans ces bâtiments sont:

I.5.1. L'enveloppe du bâtiment

L'étude menée sur l'utilisation rationnelle de l'énergie dans le bâtiment montre la tendance à réduire les besoins en chaud et en froid à travers une optimisation de l'enveloppe.

La position, la compacité, la situation, l'orientation du bâtiment et la performance des vitrages doivent donc être optimisés. L'enveloppe doit être fortement isolée et les ponts thermiques éliminés, ce qui passe le plus fréquemment par une isolation par l'extérieur.

Néanmoins la difficulté majeure reste la rénovation dans les cas où l'isolation par l'extérieur n'est pas possible. Pour répondre à ce défi, un effort important est fait pour développer des isolants sous-vide à très haute performance et de faible épaisseur. Ces isolants (de l'ordre de 5.10⁻³ W/m. K) utilisent les principes de basse pression et de confinement pour réduire le nombre et la mobilité des molécules de gaz [8].

Un effort tout particulier est porté au l'étanchéité à l'air, afin d'éviter les pertes de chaleur dues aux infiltrations d'air. Pour les labels les plus exigeants, une valeur maximale de 0,6 vol/h sous 50 Pa est imposée. Une façade double peau est constituée de deux vitres séparées par une cavité d'air.

Ses principaux avantages sont l'isolation, acoustique et thermique. Elle peut être utilisée avec différents scénarios de ventilation (figure 1.19) [25].

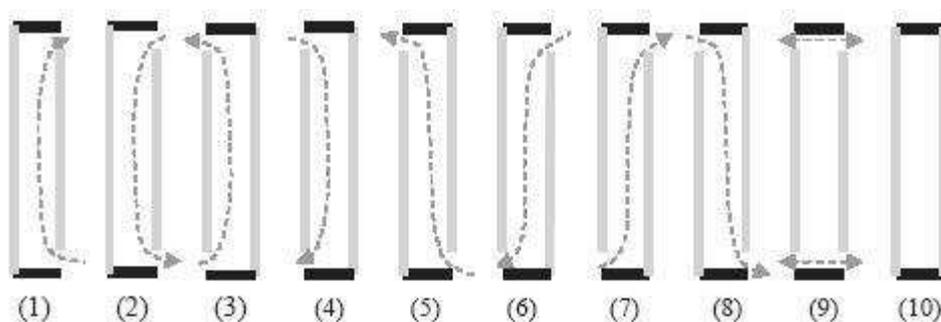


Fig. I.19. Différents scénarios de ventilation d'une façade double peau [25].

Une autre exploitation de la façade double peau est possible. Il s'agit de l'utiliser pour la récupération de chaleur tel que illustré par figure I.20. Le principe est de combiner la façade double peau avec les systèmes de climatisation et de ventilation.

En hiver, la lame d'air est utilisée en récupération de chaleur. En été, la ventilation et la protection solaire, permettent de limiter la température intérieure. Par extension, une façade double peau au Nord pourrait être exploitée pour le rafraîchissement.

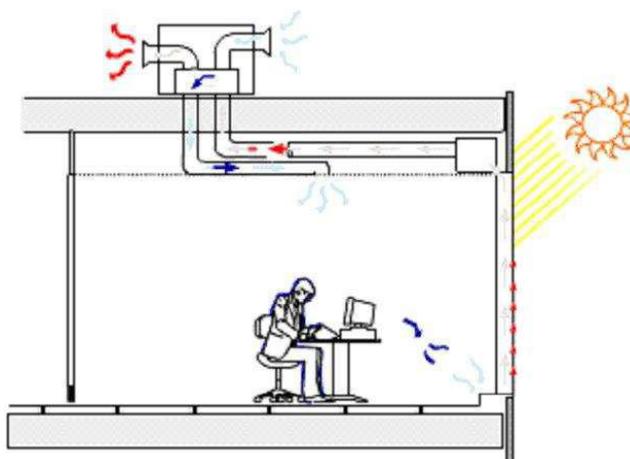


Fig. I.20. Ventilation et récupération d'énergie pour une façade double peau [8].

L'inertie thermique est étroitement liée à la capacité de stockage thermique. Elle est favorisée par la masse du bâti et par l'isolation par l'extérieur et l'intérieur. L'augmentation de l'inertie thermique est un moyen traditionnel, efficace et passif, qui permet d'améliorer le confort thermique en été. De plus, avec le regain d'intérêt pour le solaire passif, l'inertie thermique des bâtiments revient au premier plan [18].

A côté des solutions traditionnelles de murs "lourds" (béton, pisé, brique...), de nouvelles technologies sont redécouvertes et adaptées, telles que l'utilisation des matériaux à changement de phase dans l'enveloppe.

Ces matériaux (MCP) permettent de substituer au stockage par chaleur sensible, un stockage par chaleur latente qui nécessite un volume et une masse bien moindres, pour la même quantité d'énergie thermique stockée ou déstockée. Les MCP sont utilisés dans le bâtiment, soit pour le chauffage, soit pour le rafraîchissement par la stabilité de température intérieure des bâtiments.

Afin de réduire les apports solaires en période estivale et de ce fait, la puissance nécessaire au refroidissement, une protection solaire (store, brise-soleil ...) doit être associée à toutes les fenêtres. Cette dernière permet en outre d'assurer un bon confort visuel en évitant l'éblouissement [18].

I.5.2. Ventilation

Le bâtiment à basse consommation d'énergie doit être très étanche à l'air. Sa ventilation doit être maîtrisée, par le biais d'une ventilation mécanique contrôlée couplée à un système de récupération de chaleur. Selon les besoins, le maintien du confort en été peut être assuré de manière passive par un échangeur air-sol ou par une stratégie de ventilation nocturne [26]. La ventilation simple flux associée à des bouches d'entrée d'air ou d'extraction à débit régulé selon le taux d'hygrométrie ou de polluants, ne présente pas de performances suffisantes au vu des objectifs du bâtiment à basse consommation d'énergie, elle est donc exclue.

Le système double flux est souvent couplé à un puits climatique qui puise l'énergie du sol pour préchauffer l'air neuf en hiver et le rafraîchir en été. La ventilation est éventuellement utilisée comme solution passive pour le rafraîchissement du bâtiment, de manière naturelle, mécanique ou hybride ("free cooling").

I.5.3. Production d'énergie

La production d'énergie dans les bâtiments à basse consommation d'énergie est réalisée grâce à des systèmes efficaces utilisant des sources renouvelables disponibles localement telles que le soleil (conversion photovoltaïque), le vent (conversion électromécanique par aérogénérateur) ou l'énergie mécanique de l'eau (hydroélectricité).

La chaleur nécessaire au maintien du confort intérieur et au chauffage de l'eau sanitaire est assurée, soit par des panneaux solaires thermiques, soit par un équipement de cogénération fonctionnant de préférence avec une source renouvelable. L'usage d'une pompe à chaleur peut être envisagé dès lors que la production locale d'électricité à partir de ressources renouvelables est suffisante [8,18].

I.5.4. Le stockage de la chaleur

Le stockage de la chaleur est assuré, de manière passive, par la masse thermique du bâtiment et de ses composants internes et, de manière active, par un ballon d'eau chaude. Les matériaux à changement en phase, destinés à accroître l'inertie thermique des parois internes du bâtiment, sont encore en phase de développement [18].

I.6. Conclusion

Dans ce chapitre une synthèse bibliographique sur les types et les classifications des habitats à efficacité énergétique a été présentée. Le contexte énergétique du secteur du bâtiment, la réglementation thermique et les labels sont exposés. Le lecteur y trouvera les principales démarches entreprises pour des bâtiments à basse consommation d'énergie.

Chapitre II

Les modèles de calcul du rayonnement solaire

II.1. Introduction

Le rayonnement solaire incident à la surface de la terre est le résultat d'interactions complexes de l'énergie entre l'atmosphère et la surface de celle-ci. Après sa traversée de l'atmosphère, il est considéré comme la somme de deux composantes, directe et diffuse.

Un réseau de stations de surveillance solaires équipées de pyromètres et de systèmes d'acquisition de données est généralement implanté à différents endroits, pour recueillir des informations utiles sur le rayonnement solaire. Cependant, le nombre de ces stations reste insuffisant pour fournir les données sur le rayonnement solaire de toutes les zones, particulièrement dans les pays en voie de développement. Il a été, par conséquent, nécessaire de développer des méthodes pour estimer le rayonnement solaire sur la base des données météorologiques facilement disponibles [27]. Pour cela une modélisation approchée du rayonnement solaire est utilisée. Il faut noter que la connaissance de ce paramètre est indispensable à toute étude entreprise dans le domaine de l'énergie solaire, aussi bien pour les concepteurs, installateurs, architectes, utilisateurs, professionnels ou promoteurs du secteur.

Avant de présenter les principaux modèles utilisés (modèles de Capderou, de Jordan de R. Sun, de Munner, et de Perrin Brichambaut), pour l'estimation des éclaircissements incidents, sur un plan horizontal ou incliné, quelques grandeurs astronomiques (outils mathématiques incontournables), seront rappelées.

II.2. Notions d'astronomie

II.2.1. Mouvement de la terre autour du soleil

La terre décrit autour du soleil, une orbite elliptique quasi-circulaire avec une période de 365,25 jours (figure II.1). Le plan de cette orbite est appelé l'écliptique. C'est au solstice d'hiver (22 décembre) que la terre est la plus proche du soleil (144 millions de km) et au solstice d'été (22 juin), qu'elle en est la plus éloignée (154 millions de km). La distance moyenne étant de 149,75 millions de km.

La terre coupe le petit axe de son orbite, aux équinoxes de printemps (21 mars) et d'automne (23 septembre). Elle tourne sur elle-même avec une période de 24 heures. Son axe de rotation (l'axe des pôles) a une orientation fixe dans l'espace, et fait un angle avec la normale du plan de l'écliptique [27-29].

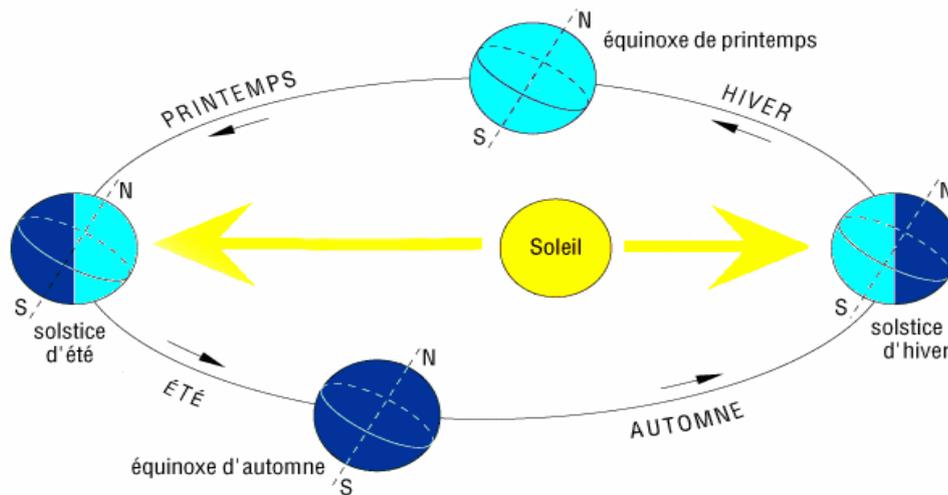


Fig. II.1: Mouvement de la terre autour du soleil [29].

Les paramètres astronomiques sont utilisés dans tout modèle de calcul basé sur des méthodes semi empiriques. Pour déterminer une position dans le ciel, un système de coordonnées appelée “système de coordonnées célestes” est employé.

II.2.2. Les coordonnées célestes

On distingue plusieurs systèmes, utilisant une grille de coordonnées projetées sur la sphère céleste qui diffèrent seulement dans le choix du plan de référence.

II.2.2.1. Les coordonnées géographiques

Les coordonnées géographiques d'un lieu définissent sa position sur Terre. Ils sont décomposés en deux éléments :

- *La longitude L* , qui donne la position Est- Ouest d'un point de la terre. Elle est comptée négativement vers l'Ouest et positivement vers l'Est, à partir du méridien Greenwich.
- *La latitude Φ* , qui, permet de repérer la distance angulaire d'un point quelconque à l'équateur. Elle varie de 0° à 90° dans l'hémisphère Nord et de 0° à -90° dans l'hémisphère Sud.

II.2.2.2. Les coordonnées horaires

Le système de coordonnées horaires (figure II.2) est un système de coordonnées célestes intermédiaire entre les systèmes de coordonnées horizontales et équatoriales. Il est formé de [29,30]:

- *La déclinaison δ* , qui est l'angle formé par la direction du soleil et le plan équatorial terrestre, et varie au cours des saisons. Sa valeur est indépendante de la position de l'observateur sur la terre. Elle ne dépend que du temps saisonnier qui, lui, résulte seulement de la position de la terre par rapport au soleil.

La déclinaison varie au cours de l'année de $+23^{\circ}27'$ à $-23^{\circ}27'$ et détermine l'inégalité des durées des journées. Elle s'obtient à partir de la formule:

$$\delta = 23.45 \sin \left[\frac{284+N}{365} \times 360 \right] \quad (\text{II.1})$$

N, étant le numéro du jour dans l'année, compté à partir du 1^{er} Janvier.

La déclinaison étant une fonction sinusoïdale, elle varie rapidement au voisinage des équinoxes (0.4° / jour) mais demeure quasiment stationnaire durant les périodes qui encadrent les solstices d'été et d'hiver [27].

- *L'angle horaire ω* . Compris entre le méridien passant par le sud et la projection du soleil sur le plan équatorial, cet angle mesure la course du soleil dans le ciel. Il est compté positivement dans le sens rétrograde de 0° à 360° .

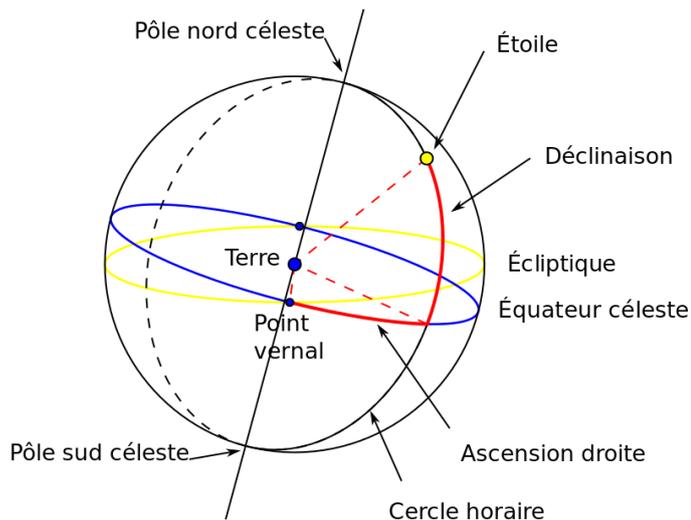


Fig. II.2. Coordonnées horaires.

II.2.2.3. Les coordonnées horizontales

Le système de coordonnées horizontales (figure II.3), également appelé “système local” est utilisé par un observateur au sol. Il sépare le ciel en deux hémisphères, l'un situé au-dessus de l'observateur et l'autre en dessous. On distingue [29,30]:

- *L'azimut du soleil a_s* , défini comme étant l'angle entre le plan vertical contenant le rayon solaire et le plan de référence (le méridien du lieu). Le plan vertical, varie entre -180° et $+180^\circ$, et est négatif à l'Est, positif à l'Ouest, par convention et vaut 0° au sud dans l'hémisphère nord.
- *La hauteur du soleil h* (l'altitude) est l'angle que fait la direction du soleil avec sa projection. Elle est comptée de 0° à 90° vers le zénith et de 0° à -90° vers le nadir. Au Zénith : $h = +90$, Au Nadir : $h = -90$, les valeurs $h > 0$ et $h < 0$ correspondent respectivement au jour et à la nuit
 $h = 0$ correspond aux lever et coucher du soleil.

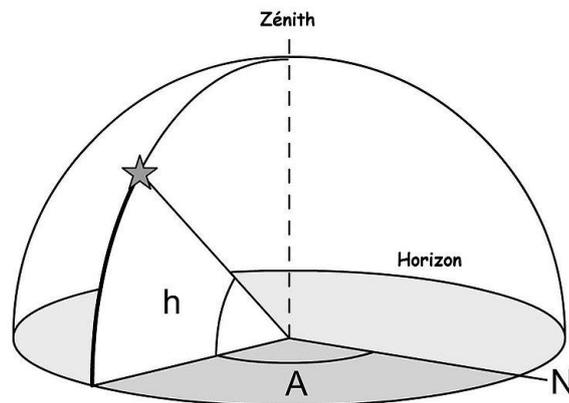


Fig. II.3. Coordonnées horizontales.

II.2.3. Les temps solaires

Le temps solaire est une mesure du temps basée sur le déplacement apparent du soleil. On distingue :

II.2.3.1. Le temps solaire vrai (T.S.V)

C'est est une mesure du temps basée sur le déplacement apparent du soleil au cours de la journée. En un instant et un lieu donné, le T.S.V est donné sous la forme suivante :

$$TSV = 12 + \omega/15 \quad (\text{II.2})$$

ω , étant l'angle horaire. Il est compté positivement l'après-midi, et négativement la matinée

$$\text{Si } \omega = 0, \text{ TSV}=12\text{h.00}$$

II.2.3.2. Le temps solaire moyen (T.S.M)

Il est donné par la relation:

$$TSM = TSV + ET \quad (\text{II.3})$$

ET est l'équation du temps, qui corrige le TSV par rapport au TSM.

$$ET = 9.87 \sin(2N') - 7.53 \cos(N') - 1.5 \sin(N') \quad (\text{II.4})$$

$$N' = (N - 81) \times 360/365 \quad (\text{II.5})$$

N est le numéro du jour dans l'année.

II.2.3.3. Le temps universel (TU)

C'est l'heure au méridien origine (Greenwich mean Time).

$$TU = TSM - L/15 \quad (\text{II.6})$$

Où L est la longitude.

L > 0, pour les lieux situées à l'Est de Greenwich

L < 0, pour les lieux situées à l'Ouest de Greenwich

TU = TSM, pour le méridien de Greenwich

II.2.3.4. Le temps légal (TL)

C'est le temps officiel d'un état. Il est donné par :

$$TL = TU + \Delta H \quad (\text{II.7})$$

ΔH : Le décalage horaire entre le méridien de Greenwich et l'état considéré.

$\Delta H = 1$ heure pour l'Algérie

II.2.4. Constante solaire

C'est la quantité moyenne d'énergie solaire reçue par une surface de 1m^2 exposée perpendiculairement aux rayons solaires et située à la limite de l'atmosphère terrestre. La valeur moyenne actuellement retenue est $I_0 = 1367 \text{ W/m}^2$.

La trajectoire de la terre autour du soleil étant elliptique, il s'ensuit une variation saisonnière de $\pm 1.6\%$ de la distance Terre Soleil.

La valeur corrigée de la constante solaire est donnée par [30]:

$$I_C = I_0 [1 + 0.0034 \cos(30(m - 1) + n)] \quad (\text{II.8})$$

Avec :

m : Numéro du mois dans l'année.

N : Numéro du jour dans le mois.

II.3. Modèles mathématiques pour l'estimation de l'éclairement solaire

De nombreux modèles ont été proposés par différents auteurs, parmi lesquels :

II.3.1. Modèle de R. Sun

Pour ce modèle, le rayonnement global incident sur un plan horizontal par ciel clair, est considéré comme étant la somme de deux rayonnements, direct et diffus, chacun étant calculé séparément.

$$I_{gh} = I_{bh} + I_{dh} \quad (\text{II.9})$$

- *Eclairement solaire direct incident sur un plan horizontal, par ciel clair*

Selon, Hofierka et al. (2002), le rayonnement direct incident sur un plan horizontal par ciel clair, est donné par [31-33]:

$$I_{bh} = I_C \exp(-0.8662 \times T_{LK} \times m \times \delta_r(m)) \times \sin(h) \quad (\text{II.10})$$

Le terme $-0.8662 T_{LK}$, est le deuxième facteur de trouble atmosphérique de Linke par ciel clair (sans dimension) corrigé par Kasten [30].

- *Eclairement solaire diffus incident sur un plan horizontal par ciel clair*

C'est le flux solaire provenant de la voûte céleste (toutes les directions) qui après avoir traversé l'atmosphère, est reçu par un plan horizontal.

Pour l'expression du rayonnement diffus, la formule publiée par Hofierka *et al.* avec une légère correction du facteur T_{LK} est utilisée. Cette correction adoptée en 2004 dans le nouvel Atlas Solaire de l'Europe (ESRA) a été également prise en considération dans la version 2007 de Meteo Norm V6, pour calculer le rayonnement diffus [33].

Le rayonnement diffus est donné par l'expression:

$$I_{dh} = I_C \times T_n(T_{LK}) \times F_d(h_0) \quad (\text{II.11})$$

$T_n(T_{LK})$ est la fonction de la transmittance diffuse. Elle ne dépend que du facteur T_{LK} corrigé, et varie entre 0 et 0.3.

Il en résulte que $T_n(T_{LK})$ prend la forme suivante:

$$T_n(T_{LK}) = -0.051843 + 0.030543T_{LK} + 0.0003797T_{LK}^2 \quad (\text{II.12})$$

F_d est la fonction diffuse angulaire. Elle dépend de la hauteur du soleil et du facteur de trouble T_{LK} corrigé.

$$F_d(h_0) = A_1 + A_2 \sin h_0 + A_3 \sin^2 h_0 \quad (\text{II.13})$$

A_i , sont des coefficients dépendants uniquement du facteur de trouble T_{LK} corrigé.

II.3.2. Modèle de Klucher

Klucher a modifié le modèle de Ralphc. Temps et K.L. Coulson, et propose la relation [34-35] :

$$I_g = I_{bh}R_b + I_{dh} \left[\frac{1+\cos(\beta)}{2} \right] \left[1 + F \sin^3 \left(\frac{\beta}{2} \right) \right] \left[1 + F \cos^2(\beta) \sin^3(\theta_z) \right] + (I_{gh}) \rho \left[\frac{1-\cos(\beta)}{2} \right] \quad (\text{II.14})$$

F étant le facteur de modification de la composante diffuse :

$$F = 1 - \left(\frac{I_{dh}}{I_{bh} + I_{dh}} \right)^2 \quad (\text{II.15})$$

Klucher (1979) a constaté que le modèle isotopique donne de bons résultats par un ciel couvert mais sous-estime l'irradiance dans le cas d'un ciel clair ou partiellement couvert [30].

II.3.3. Modèle de Capderou

Dans la préface de l'Atlas Solaire de l'Algérie (A.S.A), C. Perrin de Brichambaut cite que Capderou a proposé un modèle mathématique de calcul des rayonnements direct et diffus incidents sur un plan horizontal [33, 36, 37].

Le modèle de Capderou utilise le trouble atmosphérique pour calculer les composantes directe et diffuse de l'irradiation reçue sur un plan. L'absorption et la diffusion causées par les constituants de l'atmosphère peuvent être exprimées par des facteurs de trouble.

Dans le modèle de Capderou, le facteur de trouble atmosphérique de Linke par ciel clair est donné par [30, 38, 39]:

$$T_L = T_0 + T_1 + T_2 \quad (\text{II.16})$$

T_0 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 de proposer l'expression suivante :

$$T_0 = 2.4 - 0.9 \sin(\Phi) + 0.1 (2 + \sin(\Phi)) \times A_{he} - 0.2 \times Z - (1.22 + 0.14 \times A_{he}) \times (1 - \sin(h)) \quad (\text{II.17})$$

Avec :

$$A_{he} = \sin \left[\left(\frac{360}{365} \right) \times (n - 121) \right] \quad (\text{II.18})$$

Z : Altitude du lieu

T_1 : 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:

$$T_1 = 0.89^Z \quad (\text{II.19})$$

T_2 : 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). En fonction du coefficient de trouble d'Angstrom β , T_2 a pour expression:

$$T_2 = (0.9 + 0.4A_{he})(0.63)^Z \quad (\text{II.20})$$

- *Eclairement solaire reçu sur un plan horizontal par ciel clair*

- L'éclairement direct par ciel clair obtenu sur un plan horizontal est donné par :

$$I_{bh} = I_C \times \exp \left[-T_L \times \left(0.9 + \frac{9.4}{0.89^Z} \sin(h) \right)^{-1} \right] \sin(h) \quad (\text{II.21})$$

- L'éclairement diffus incident sur un plan horizontal est:

$$I_{dh} = I_C \times \exp\left((-1 + 1.06 \log(\sin(h))) + a - \sqrt{a^2 + b^2}\right) \quad (\text{II.22})$$

Avec:

$$a=1.1$$

$$b = \log(T_L - T_0) - 2.8 + 1.02 \times (1 - \sin h)^2 \quad (\text{II.23})$$

- *Eclairement solaire global incident sur un plan horizontal*

$$I_{gh} = I_{bh} + I_{dh} \quad (\text{II.24})$$

- *Eclairement solaire global reçu sur un plan incliné*

L'éclairement direct est la projection de la composante normale sur un plan incliné.

$$I_b = I_C \times \exp\left[-T_L \times \left(0.9 + \frac{9.4}{0.89z} \sin(h)\right)^{-1}\right] \cos(\theta) \quad (\text{II.25})$$

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

$$I_d = I_{dciel} + I_{dsol} + \delta_i \frac{1 + \cos(\beta)}{2} \quad (\text{II.26})$$

$$\delta_i = 0.9(\rho - 0.2)I_{gh} \exp\left(-\frac{4}{\sqrt{T_L - T_0}}\right) \quad (\text{II.27})$$

Il en résulte que l'éclairement global incident, à un instant donné sur un plan incliné est:

$$I_g = I_b + I_d \quad (\text{II.28})$$

II.3.4. Modèle de Jordan

Dans ce modèle, le rayonnement solaire global incident sur une surface inclinée est supposé être composé de trois éléments, le rayonnement solaire direct (I_d), le rayonnement solaire diffus isotropique (I_b) (celui qui arrive uniformément de la voûte céleste indépendamment de sa direction) et le rayonnement solaire diffus réfléchi par le sol (I_R) [40, 41, 42, 43].

L'éclairement direct sur la normale est:

$$I_{bn} = I_C \times \tau_b \quad (\text{II.29})$$

Avec :

$$I_C = I_0 \times [1 + 0.0034 \times \cos(30 \times (m - 1) + n)] \quad (\text{II.30})$$

$$\tau_b = a_0 + a_1 \exp\left(-k/\sin h\right) \quad (\text{II.31})$$

Les coefficients k , a_0 , a_1 étant des constantes qui dépendent de l'état atmosphérique. Ils sont définis comme suit:

$$k = r_k [0.2711 - 0.01858(2.5 - Z)^2] \quad (\text{II.32})$$

$$a_0 = r_0 [0.4237 - 0.00821(6 - Z)^2] \quad (\text{II.33})$$

$$a_1 = r_1 [0.5055 - 0.00595(6.5 - Z)^2] \quad (\text{II.34})$$

Avec :

Z: Altitude de l'observateur

r_0 , r_1 et r_k : Coefficients correcteurs adimensionnels (Tableau II.1).

Tableau II.1: Coefficients de correction adimensionnels [43].

Type de temps	r_0	r_1	r_k
Tropical	0.95	0.98	1.02
Été (altitude moyenne)	0.97	0.99	1.02
Été (Lat. Sub. Atrice)	0.99	0.99	1.01
Hiver (moyenne latitude)	1.03	1.03	1.00

L'éclairement direct sur une surface horizontale est donné par:

$$I_{bh} = I_C \times \tau_b \times \sin h \quad (\text{II.35})$$

L'éclairement diffus par ciel clair sur un plan horizontal a pour expression :

$$I_{dh} = I_C \times (0.2710 - 0.2939 \times \tau_b) \times \sin h \quad (\text{II.36})$$

- Eclairement solaire global reçu sur un plan horizontal

$$I_g = I_{bh} + I_{dh} \quad (\text{II.37})$$

- Eclairement solaire global sur un plan incliné

$$I_g = I_{bh} R_b + \frac{I_{dh}(1+\cos\beta)}{2} + \rho(I_{bh} + I_{dh}) \frac{(1-\cos\beta)}{2} \quad (\text{II.38})$$

$$R_b = \cos\theta / \sin h \quad (\text{II.39})$$

Où ρ est l'albédo du sol (tableau II.2)

Tableau II.2: Valeurs de l'albédo du sol " ρ " [43].

Nature du sol	Neige fraiche	Neige Ancienne	Sol rocheux	Sol cultivé	Forêt	Etendue
Valeurs ρ	0.8 -0.9	0.5 -0.7	0.15 -0.25	0.07 -0.14	0.06 -0.2	0.05

II.3.5. Méthode Semi-Empirique de Perrin Brichambaut

La méthode empirique de Perrin Brichambaut a permis d'aboutir à une bonne estimation de l'énergie reçue par un capteur à orientation quelconque.

Pour un ciel clair, les rayonnements direct, diffus et global reçus par un capteur sont respectivement donnés par les relations suivantes [30, 44,45] :

$$I_d = \left(\frac{1+\cos(\beta)}{2} \right) I_{dh} + I_{gh} \left(\frac{1-\cos(\beta)}{2} \right) \rho \quad (\text{II.40})$$

$$I_b = A \left(\exp \left(- \frac{1}{B \sin(h+2)} \right) \right) \cos(\theta) \quad (\text{II.41})$$

$$I_{dh} = A(\sin(h))^{0.4} \quad (\text{II.42})$$

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

Où, A, A'', B'' sont des constantes qui dépendent de l'état de l'atmosphère (Tableau II.3) [30].

Tableau II .3: Paramètres décrivant l'état de l'atmosphère [45].

Etat de l'atmosphère	A	A''	B''
Ciel très clair (CTC)	1210	1150	1.15
Condition normales de ciel clair (CNCC)	1230	1080	1.22
Ciel clair pollué(CCP)	1200	990	1.25

Pour un ciel couvert, le rayonnement global est donné par:

$$I_g = KI_g(1 + 0.3 \sin(h)) \quad (\text{II.44})$$

Où k est le coefficient qui dépend de l'état du ciel, qui prend les valeurs :

$k = 0.6$ pour un ciel très clair (CTC).

$k = 0.3$ pour des condition normales de ciel clair (CNCC).

$k = 0.6$ pour un ciel clair pollué (CCP).

II.3.6 Modèle de Hay-Davies

Hay et Davies, (1980) proposent un modèle dans lequel ils supposent que le rayonnement diffus du ciel comporte une composante isotrope et une autre directe (circum solaire). La composante du cercle de l'horizon n'est pas prise en compte.

$$I_g = (I_{gh}) \times R_{bn} + I_{dh} \times (1 - A_i) \times \left[\frac{1 + \cos(\beta)}{2} \right] + (I_{gh}) \times \rho \times \left[\frac{1 - \cos(\beta)}{2} \right] \quad (\text{II.45})$$

L'indice d'anisotropie A_i , représente la transmission à travers l'atmosphère ($A_i = \frac{I_{bn}}{I_{ON}}$) [34, 46, 48].

II.3.7. Modèle de Reindl

En plus des composantes, isotrope et circumsolaire, le modèle de Reindl tient compte également de la composante du cercle de l'horizon L'éclairement solaire totale ainsi calculé par [27,30] :

$$I_g = (I_{bh} + I_{dh}A_i)R_b + I_{bh}(1 - A_i) \left[\frac{1 - \cos(\beta)}{2} \right] \left[1 + \sqrt{\frac{I_{bh}}{I_{bh} + I_{dh}}} \sin^3 \left(\frac{\beta}{2} \right) \right] + (I_{gh})\rho \left[\frac{1 - \cos(\beta)}{2} \right] \quad (\text{II.46})$$

II.3.8. Modèle de Munner

Le modèle développé par Munner, peut être classé dans la catégorie des modèles anisotropiques. Pour estimer le rayonnement global incident sur un plan horizontal ou incliné dans les conditions de ciel clair ou couvert [41], les expressions suivantes sont utilisées:

- Pour un ciel couvert:

$$I_{dT} = I_d \cdot \left[\left(\frac{1 + \cos\beta}{2} \right) + 0.25227 \cdot \left(\sin\beta - \beta \cdot \cos\beta - \pi \cdot \left(\sin \frac{\beta}{2} \right)^2 \right) \right] \quad (\text{II.47})$$

- Pour un ciel clair:

$$I_{dT} = I_d \cdot \left[\left(\left(\frac{1 + \cos\beta}{2} \right) + \left(\sin\beta - \beta \cdot \cos\beta - \pi \cdot \left(\sin \frac{\beta}{2} \right)^2 \right) \cdot \left(0.00263 - 0.271 \cdot \frac{I_b}{I_0} - 0.6883 \cdot \left(\frac{I_b}{I_0} \right)^2 \right) \right) \cdot \left(1 - \frac{I_b}{I_0} \right) + \left(\frac{I_b}{I_0} \cdot \frac{\cos\delta}{\cos\sigma} \right) \right] \quad (\text{II.48})$$

II.4. Résultats et discussions

Afin de choisir le modèle qui sera utilisé dans le cadre de ce travail, les cinq modèles (modèles de Capderou, de Jordan, de R. Sun, de Munner, et de Perrin Brichambaut) présentés, seront comparés aux mesures expérimentales de I. Tabet et al [30], qui ont été réalisées à l'unité de recherche appliquée en énergies renouvelables (URAER) située à Ghardaia (dans le sud Algérien).

En se basant sur les principaux indicateurs statistiques [30] :

- *Le coefficient de détermination (R^2)*

L'indicateur R^2 varie entre 0 et 1, une valeur de 1 ou proche de 1 indique un parfait accord entre la valeur mesurée et la valeur calculée, par contre une valeur proche de 0 indique un total désaccord.

Si $R^2=1$ ou $R^2\approx 1$: il y a un parfait accord entre la valeur mesurée et celle calculée.

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^k (I_{ghm} - I_{ghc})^2}{\sum_{i=1}^k (I_{ghm} - I_{ghmm})^2} \quad (\text{II.49})$$

- *L'erreur quadratique moyenne (RMSE).*

La *RMSE* est une mesure de la variation des valeurs calculées, selon chaque modèle autour des valeurs mesurées. Plus sa valeur est petite, plus le modèle est meilleur.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{K} \sum_{i=1}^k (I_{ghm} - I_{ghc})^2} \quad (\text{II.50})$$

Les interpolations polynomiales des données expérimentales de l'éclairement solaire global, pour les jours choisis sont consignées dans le tableau II.4.

Tableau II .4: Interpolations polynomiales des données expérimentales de l'éclairement solaire global pour un ciel clair [30].

Numéro du jour	Equation polynomiale
17/03/2013 (17)	$I_{ghm} = 10339.1158 - 4025.5659TL + 546.8982TL^2 - 30.3113TL^3 + 0.58809dTL^4$
16/02/2013 (47)	$I_{ghm} = 8167,8916 - 3316,44693TL + 461,6669TL^2 - 25,5773TL^3 + 0.48764TL^4$
16/03/2013 (75)	$I_{ghm} = 3853,6907 - 1868,9601TL + 289,5572TL^2 - 16,7414TL^3 + 0.3214TL^4$
13/03/2013 (103)	$I_{ghm} = 4356,2992 - 1341,45967TL - 11,58546TL^2 + 40,0491TL^3 - 4.6099TL^4 + 0.2014TL^5 - 0.0031TL^6$
24/05/2013 (142)	$I_{ghm} = 1846,75973 - 1083,4598TL + 192,0004TL^2 - 11,68024TL^3 + 0.2276TL^4$

11/06/2013 (162)	$I_{ghm}=2070,3234-1165,4234TL+202,5673TL^2-12,2479TL^3+0.2385TL^4$
17/07/2013 (199)	$I_{ghm}=11832,1794-6015,3315TL+1153.7364TL^2-107,7958TL^3+5.4672TL^4-0,1487TL^5+0,0017TL^6$
16/08/2013 (228)	$I_{ghm}=3576,9330-1726,1766TL+271,8486TL^2-15,8935TL^3+0,30824TL^4$
15/09/2013 (259)	$I_{ghm}=-13382,2588+8434.6237TL-2180,650TL^2+287,8109TL^3-20,01326TL^4+0,69723TL^5-0,00961TL^6$
15/10/2013 (288)	$I_{ghm}=39731,5160-20858,0421TL+4378,6028TL^2-475,2637TL^3+28,5829TL^4-0,9097TL^5+0,0119TL^6$
14/11/2013 (318)	$I_{ghm}=6273,896-2727,670TL+401,851TL^2-23,392TL^3+0467TL^4$
10/12/2013 (345)	$I_{ghm}=35034,0002-18227,0847TL+3823,9069TL^2-420,1366TL^3+25,9116TL^4-0,85475TL^5+0,0117TL^6$

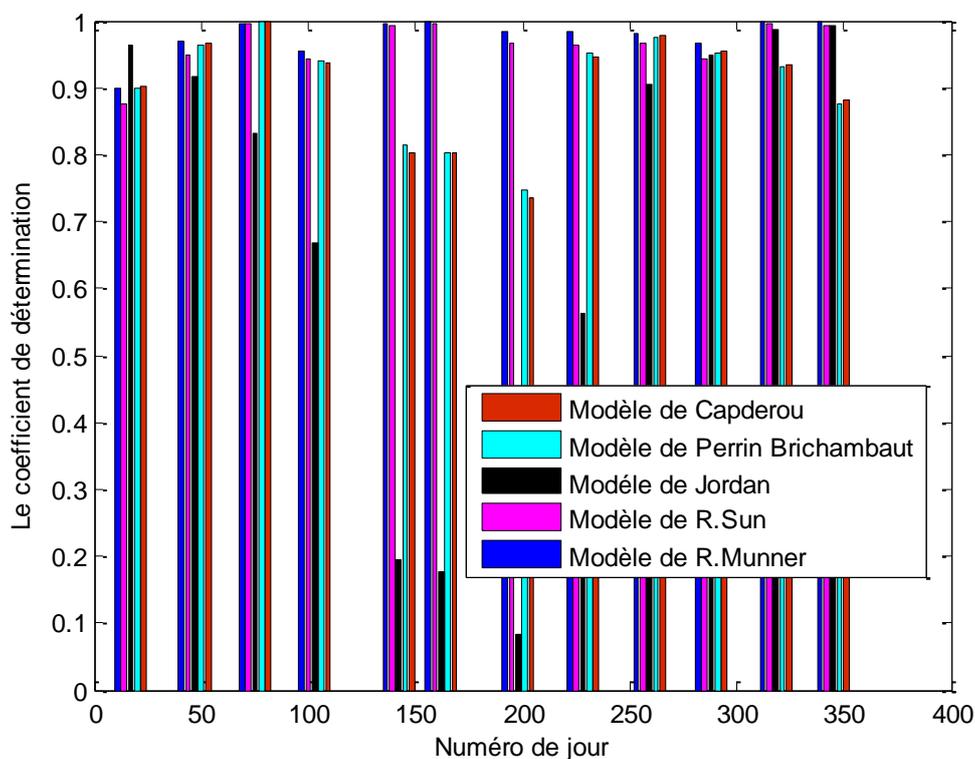


Fig.II.4.Le coefficient de détermination

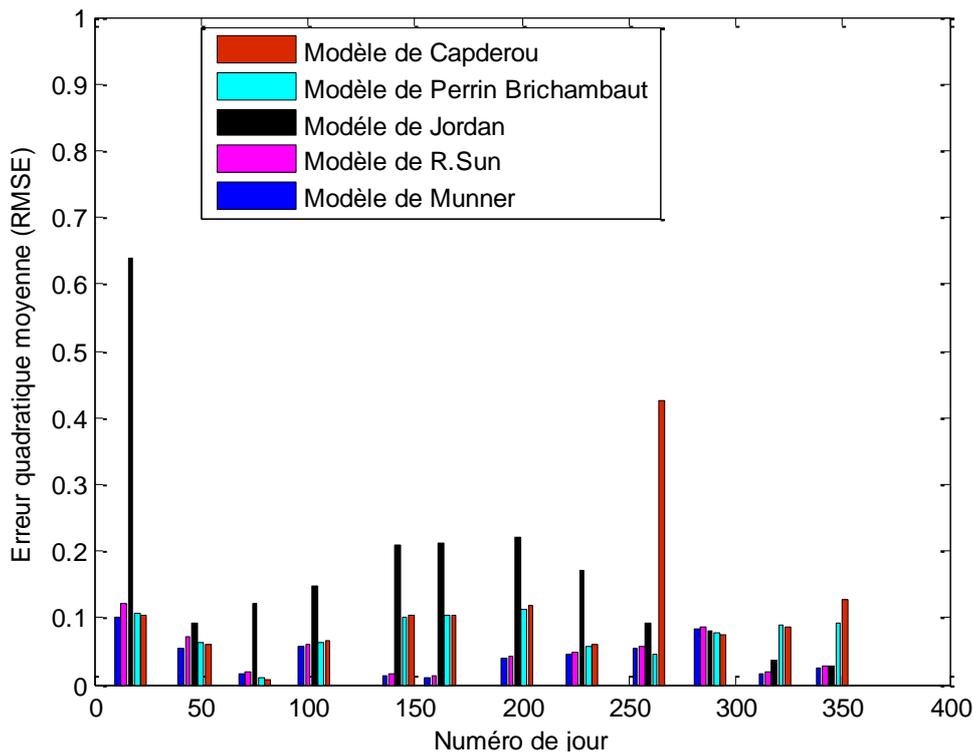


Fig.II.5. L'erreur quadratique moyenne (RMSE)

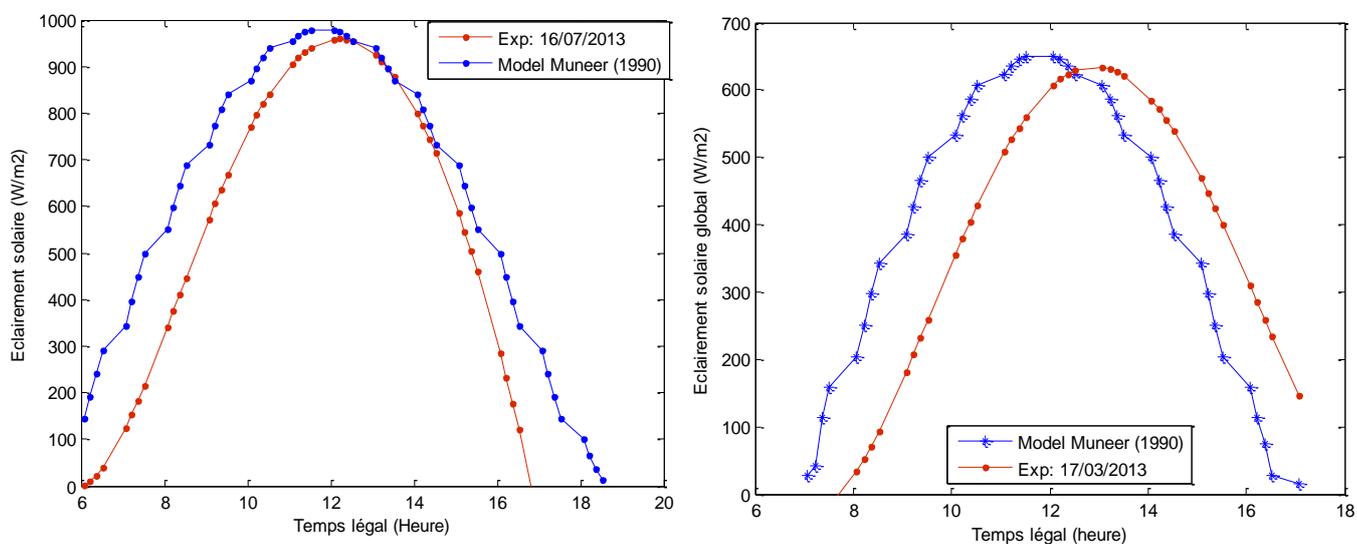


Fig.II.6. Comparaison entre les résultats obtenus par le modèle de Munner et les données expérimentales de l'éclairement global.

L'analyse des figures II.4, II.5, II.6 permet les observations suivantes:

- Le modèle de Capderou est bien adapté pour estimer l'éclairement solaire pour un ciel clair durant l'année.
- Le modèle de Perrin de Brichambaut peut être utilisé pour estimer l'éclairement solaire global dans cette région.

- Le modèle de Jordan donne des résultats moins précis par rapport aux deux modèles précédents.
- Pour le modèle de R. Sun, on remarque que la plupart des valeurs du coefficient de détermination R^2 et l'erreur quadratique moyenne ($RMSE$) indiquent que ce modèle donne des prédictions en bon accord avec les données expérimentales.
- Pour le modèle de Munner, on peut noter que la majeure partie des valeurs du coefficient de détermination R^2 sont supérieures à 0.9 pour toutes les journées choisies, de même que les valeurs de l'erreur quadratique moyenne ($RMSE$) sont inférieures à 0.08, ce qui indique que ce modèle donne des prédictions en bon accord avec les données expérimentales.

II.5. Conclusion

Dans ce chapitre une comparaison des valeurs mesurées au site de Ghardaïa par Tabet et al [30] avec les modèles empiriques qui permettent d'estimer l'éclairement global reçu sur un plan incliné, à partir des éclaircements mesurés sur un plan horizontal, a été entreprise.

Nous avons constaté que la quasi-totalité des modèles utilisée (pour les journées choisies) est en bon accord avec les données expérimentales. D'autre part, les irradiations globales journalières calculées pour chaque journée choisie, comparées aux résultats de mesures obtenus par une interpolation numérique sont également en bon accord.

En outre, il a été constaté que le modèle de Munner est généralement le plus adapté pour l'estimation de l'éclairement solaire incident sur une surface horizontale, même s'il ne présente que peu d'avantage par rapport à celui de R. Sun. Par contre, la méthode de Jordan donne "parfois" des résultats qui divergent radicalement des valeurs mesurées au niveau de Ghardaïa.

C'est sur cette base que nous avons choisi d'utiliser les modèles de Munner ou de R. Sun, pour calculer les éclaircements instantanés incidents sur le toit de l'habitat, pour toute l'année.

Chapitre III

Panneaux photovoltaïques dans les bâtiments

III.1. Introduction

Aujourd'hui l'énergie solaire photovoltaïque est la solution la plus utilisée pour générer des bilans énergétiques positifs dans les bâtiments basse consommation d'énergie (BC). Cependant, la production d'énergie électrique de ces systèmes photovoltaïques est conditionnée essentiellement par les données météorologiques, l'angle d'inclinaison, la forme des panneaux, les modes d'intégration des panneaux PV dans les bâtiments etc.

Le présent chapitre de la thèse vise à étudier la contribution de l'énergie solaire photovoltaïque dans l'habitat à basse consommation d'énergie en Algérie.

III.2. Systèmes photovoltaïques pour l'habitat

Les systèmes PV sont classés en deux grandes catégories, selon la manière dont l'énergie est utilisée [50]. On distingue :

III.2.1. Systèmes autonomes

Ces systèmes ont pour rôle l'alimentation d'un ou de plusieurs habitats situés dans des zones éloignées du réseau électrique (habitat difficile d'accès en montage ou sur une île). Le principe d'un système PV autonome, qui permet de transformer l'énergie solaire en énergie électrique, destinée à alimenter des équipements ne nécessitant pas une grande puissance électrique, (lampes, télévision, ordinateur, pompes etc.) est illustré par la figure III.1.

Les panneaux solaires fournissent généralement une tension nominale de 12V en courant continu (CC), adaptable en fonction de son utilisation, (12VCC, 24VCC, 220VCA ou 110 VCC).

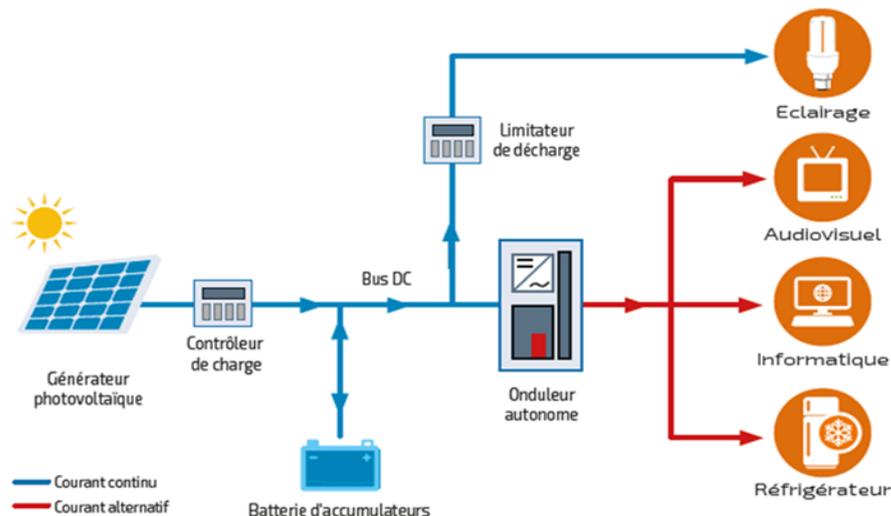


Fig.III.1. Schéma de principe d'un système PV autonome.

III.2.2. Systèmes Connectés au réseau

Ces systèmes sont installés sur un site raccordé au réseau, généralement, sur des habitations ou des locaux bien exposés à l'ensoleillement. Une installation non autonome raccordée au réseau électrique est représentée sur la figure III.2. Le raccordement ne peut se faire qu'après transformation, à l'aide d'un onduleur, du courant continu de tension variable fourni par les panneaux, en courant alternatif adapté aux caractéristiques du réseau. L'électricité produite peut être vendue partiellement ou en totalité [51].

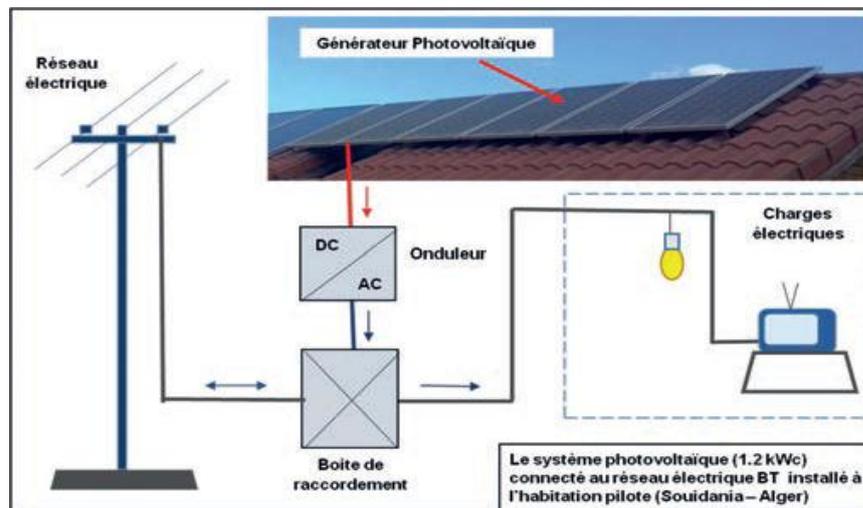


Fig.III.2. Schéma de principe d'un système PV connecté au réseau.

III.2.3. Composants d'une installation photovoltaïque

Les installations photovoltaïques comprennent essentiellement les éléments suivants [51]:

- Les panneaux solaires photovoltaïques qui permettent de produire la quantité requise d'électricité.
- Les batteries solaires pour stocker l'énergie produite par les panneaux.
- Le régulateur de charge ou limiteur de charge qui permet de protéger les batteries d'accumulateurs contre les surcharges et décharges profondes.
- Le convertisseur dont le rôle est d'adapter la tension CC délivrée par la batterie solaire à la tension d'alimentation du récepteur si elle est plus haute ou plus basse.
- L'onduleur qui transforme le courant continu (CC) en courant alternatif (CA).
- Les accessoires, tels que les câbles qui assurent le raccordement des composants.

III.2.3.1. La cellule Photovoltaïque

La plupart des systèmes photovoltaïques sont sous forme de panneaux. Ces derniers sont soit posés sur des supports directement orientés vers le soleil, soit installés le long des parois de bâtiment, voire incorporés à celles-ci. Les cellules PV peuvent être intégrées au textile pour faciliter leur installation dans les bâtiments. Un panneau photovoltaïque est constitué de plusieurs cellules (figure III.3) [52].



Fig. III.3. Quelques types de panneaux photovoltaïques.

Les cellules photovoltaïques sont des matériaux à base de semi-conducteur qui, soumis à un rayonnement solaire, produisent à leur bornes une différence de potentiel. La tension générée peut varier entre 0.3V et 0.7V (figure III.4) [53-57].

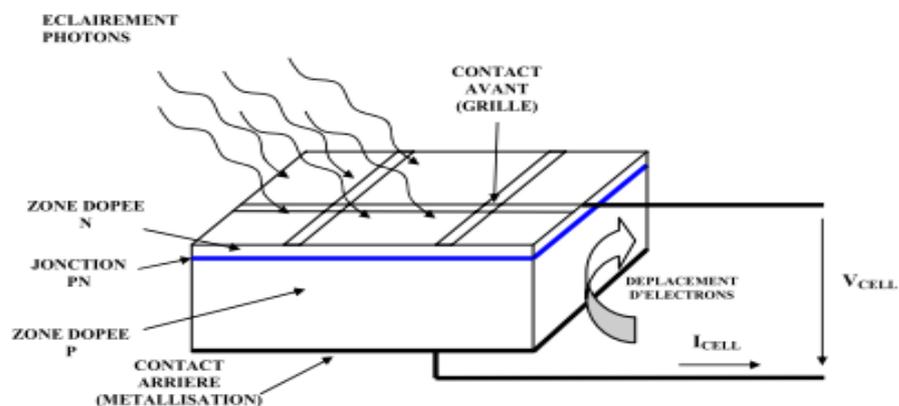


Fig. III.4. Schéma descriptif d'une cellule photovoltaïque [30].

La capacité mondiale de photovoltaïque installée est passée de 6.083 MW en 2006 à 219.297 MW en 2015. Cette croissance est due en partie aux avancées technologiques enregistrées dans la production des cellules PV, sur ses différentes filières.

Durant la dernière décennie, le rendement moyen des modules PV commercialisés à base de silicium est passé de 12% à 17% [58]. La carte publiée par NREL montre que le photovoltaïque gardera encore une bonne tendance de croissance sur les années à venir (figure III.5).

Une grande avancée sur les cellules en silicium cristallin (C-Si) hétérojonction a été enregistrée en 2016. Les laboratoires NREL et le CSEM en collaboration, ont développé une nouvelle cellule In Ga P/Si (Indium Gallium Phosphide) avec un rendement de 29.8%. A l'opposé, l'évolution du rendement des cellules à base du c-Si en mono-jonction continue à stagner. Il faut noter que le mono cristallin (mono-Si) et le multi cristallin (mc-Si) sont les plus commercialisés dans le monde [58].

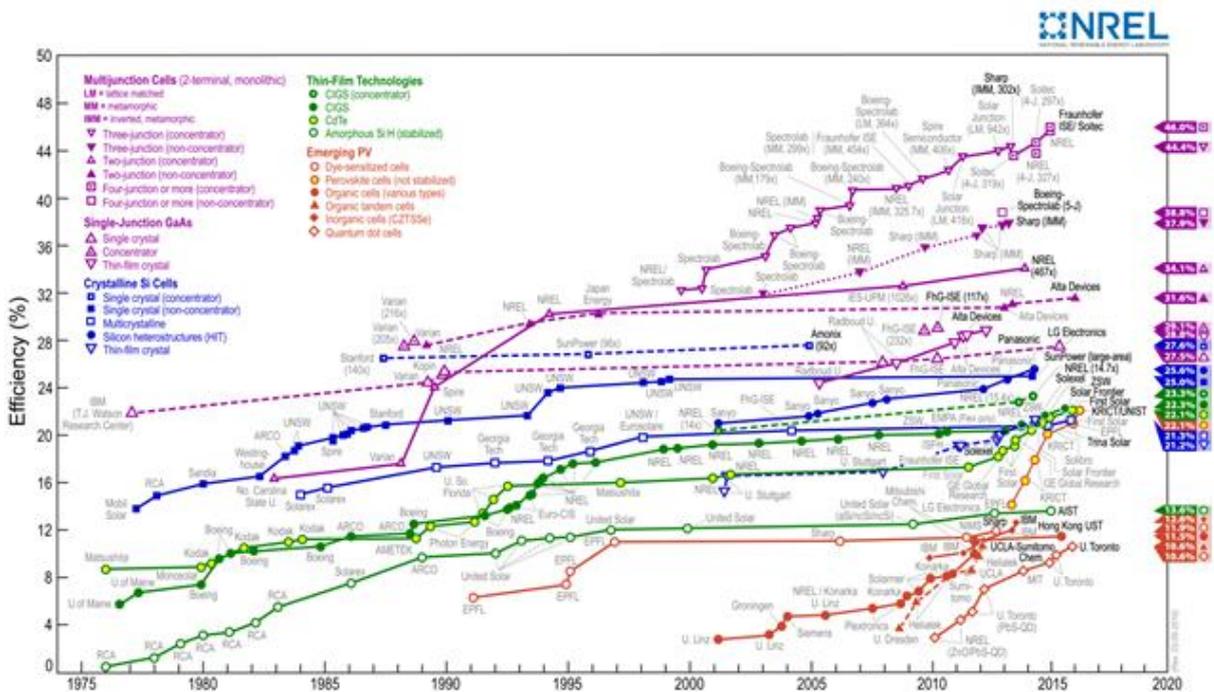


Fig. III.5. Évolution des records de rendement de chaque filière de cellules photovoltaïques [58].

III.2.3.2. Modélisation de la cellule

Sous l'obscurité, le courant dans une telle structure de type jonction PN (appelé courant d'obscurité) est donné par la relation:

$$I_D = I_s \left(\exp \left(\frac{qV_D}{nKT} \right) \right) \quad (\text{III.1})$$

Le courant d'obscurité correspondant au courant de diode (I_D), résulte de la polarisation de la jonction. Le courant délivré sur une charge par une cellule photovoltaïque éclairée s'écrit alors:

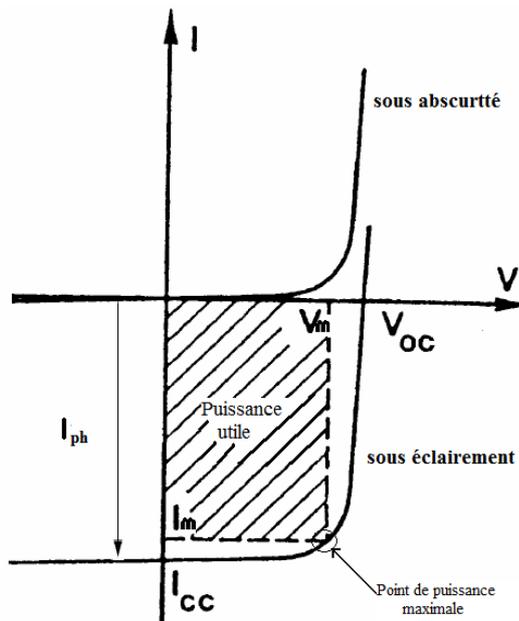
$$I_{cell} = I_{cc} - I_D \quad (\text{III.2})$$

Soit :

$$I_{cell} = I_{cc} - I_s \left(\exp \left(\frac{qV_D}{nKT} \right) \right) \quad (\text{III.3})$$

Ainsi, dans une cellule photovoltaïque deux courants s'opposent, les courants d'éclairement et d'obscurité.

La caractéristique d'une cellule sous obscurité est identique à celle d'une diode, sous éclairement (figure III.6).



- **Figure III.6 :** Caractéristiques $I=f(V)$ sous obscurité et sous éclairement d'une cellule photovoltaïque.

Les grandeurs caractéristiques pouvant être extraites du graphique représenté sur la figure III.6 sont:

- V_{co} : Tension de circuit ouvert. Elle représente la tension aux bornes de la cellule sous éclairement, sans circuit de charge.

V_{co} est donnée par la relation :

$$V_{co} = \frac{KT}{q} \ln \left(\frac{I_{cc}}{I_s} - 1 \right) \quad (\text{III.4})$$

- I_{cc} : Courant de court-circuit correspondant à $V=0$.
- V_m : Tension correspondant à la puissance maximale fournie.
- I_m : Courant correspondant à la puissance maximale fournie.

Le point de fonctionnement est imposé par la résistance de charge et non par la cellule elle-même. Un choix judicieux de la résistance de charge permettra par conséquent d'obtenir la puissance maximale, soit: $P_m = V_m \cdot I_m$.

Deux autres paramètres sont définis:

- FF : Facteur de forme, qui détermine la qualité électrique de la cellule.

$$FF = \frac{V_m I_m}{V_{co} I_{cc}} \quad (\text{III.5})$$

Dans le cas d'une cellule idéale, le facteur de forme FF ne peut être supérieur à 0,89, du fait de la relation exponentielle liant courant et tension.

- η : Rendement défini par le rapport entre la puissance électrique fournie par la cellule et la puissance incidente.

$$\eta = \frac{V_m I_m}{I \cdot S} \quad (\text{III.6})$$

Avec:

I : Eclairement énergétique.

S : Surface de la cellule.

Le modèle, double diodes est choisi pour représenter une cellule photovoltaïque sous une forte radiation (figure III.7).

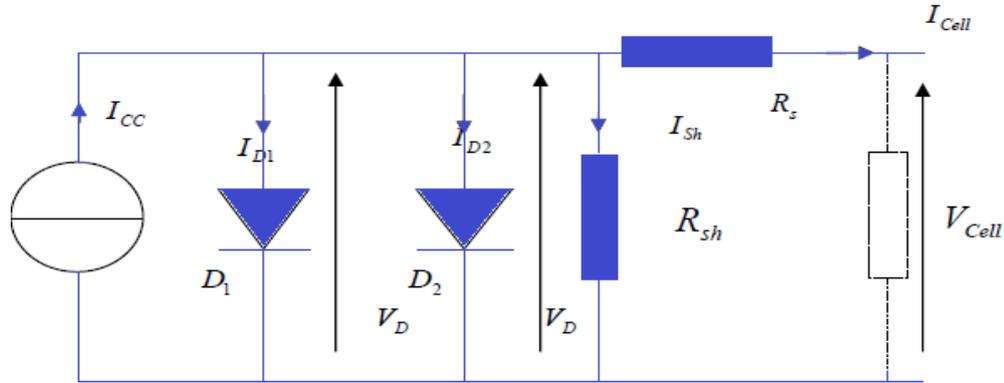


Fig. III.7. Modélisation double diodes d'une cellule PV.

$$I_{cell} = I_{cc} - I_{D1} - I_{D2} - I_p \quad (\text{III.7})$$

L'équation (III.7) du courant généré par la cellule peut être mise sous la forme suivante:

$$I_{cell} = I_{cc} - I_{s1} \left(\exp \left(\frac{q(V_{cell} + R_s I_{cell})}{n_1 K T} \right) - 1 \right) - I_{s2} \left(\exp \left(\frac{q(V_{cell} + R_s I_{cell})}{n_2 K T} \right) - 1 \right) - \frac{V_{cell} + R_s I_{cell}}{R_{sh}} \quad (\text{III.8})$$

Le courant généré par une cellule photovoltaïque dépend directement de l'éclairement auquel elle est soumise [56]. Selon les technologies de cellules, la température a une influence plus ou moins importante sur le comportement électrique de la cellule. Si la température augmente à proximité de celle-ci, la bande interdite diminue, ce qui conduit à une légère augmentation de courant. Néanmoins, la tension de circuit ouvert est fortement diminuée.

Parmi les différents modèles électriques, on peut citer:

- **Modèle à deux diodes:**
 - Modèle à sept paramètres (7p)
 - Modèle à six paramètres (6p)
 - Modèle à cinq paramètres (5p)
- **Modèle à une diode:**
 - Modèle à quatre paramètres (4p)
 - Modèle à trois paramètres (3p)

III.2.3.3. Module photovoltaïque

Les cellules photovoltaïques ne sont pas exploitables sous cette forme. Pour atteindre des puissances (tensions et courants) élevées, il faut les assembler en série ou en parallèle, (module photovoltaïque), selon la configuration des puissances projetées. Ce dernier est généralement constitué de 36 cellules.

Les modules PV, obtenus sous cette forme ont une durée de vie, de 25 à 30 ans, pour la technologie du silicium.

Différentes technologies sont commercialisées sur le marché. La filière du si-poly cristallin, (rendement moyen de 16 à 18%, coût moins élevé), détient 50.2%, de la part du marché. La filière du silicium mono cristallin (rendement élevé de 18 à 22%, coût élevé) représente plus que 34.6% et celle des couches minces (avec un rendement de 8 à 12%) est de l'ordre de 15.2% de la production mondiale [58].

III.2.3.4. Effet de la variation d'éclairement et de la température

Les caractéristiques $I(V)$ d'une cellule PV dépendent directement de l'éclairement et de la température. L'allure générale de $I(V)$ et $P(V)$ d'un module PV de 60 cellules monocristallin, 260W (Condor Electronics) pour différents éclairements est illustré par la figure III.8. L'examen des courbes conduit aux observations suivantes:

- Le courant de court-circuit est pratiquement égal au photo courant, qui lui-même est directement proportionnel à la surface éclairée.
- La tension à vide V_{oc} varie peu avec l'éclairement et peut donc être considérée comme une constante pour une installation donnée.
- Les différentes caractéristiques tension-courant correspondant à différents éclairements ont pratiquement la même allure. Elles sont décalées par rapport à la caractéristique d'obscurité d'une distance proportionnelle au rayonnement solaire incident. Ce décalage s'effectue dans une direction presque verticale du diagramme (figure III.8) [59-61].
- La puissance optimale croît avec l'éclairement. Néanmoins, cette augmentation devient moins rapide aux forts niveaux de ce dernier. On pourra par ailleurs remarquer que la tension (V_{MPP}) correspondant à la puissance maximale (P_{MPP}) ne varie que très peu en fonction de l'éclairement, contrairement au courant qui lui augmente significativement avec celui-ci.

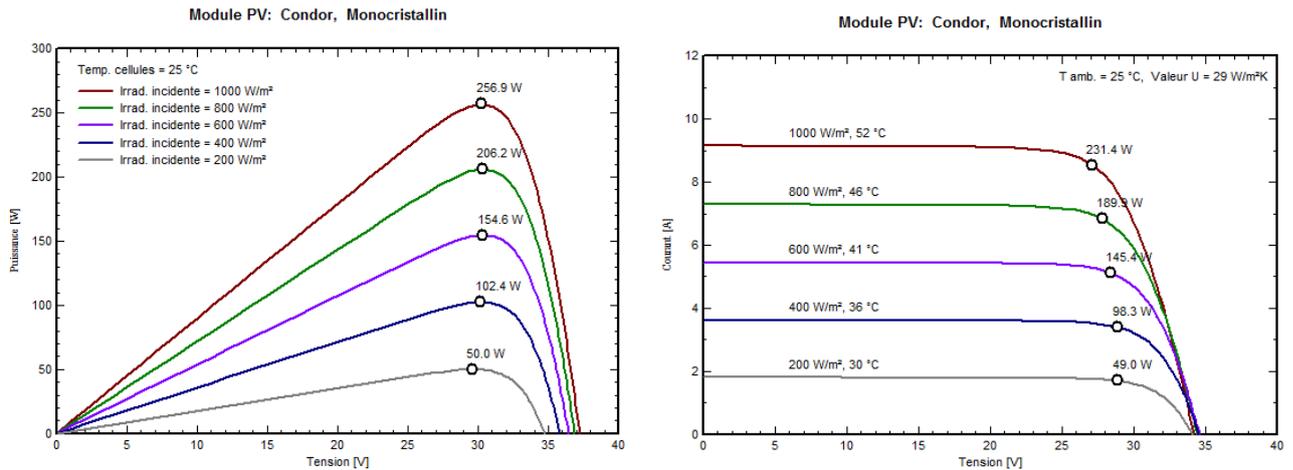


Figure III.8. Influence de l'éclairement sur I-V et P-V.

La température est un paramètre clé dans le comportement des photopiles, du fait qu'une cellule exposée à un éclairement de $1kW/m^2$ n'en transforme que 12% au plus en électricité, le reste est réfléchi (6 à 8%) et dissipé en chaleur (80 à 82%).

L'observation de la variation des caractéristiques d'un panneau de 60 cellules monocristallin 260W (Condor Electronics) en fonction de sa température et pour un éclairement donné (figure III.9) permet de noter:

- Une augmentation notable du courant direct de la photopile qui conduit à une diminution significative de la tension de circuit ouvert (environ $-2.2mV/K$) [58-60].
- Une décroissance de la tension à vide V_{oc} et de la puissance maximale avec l'élévation de la température.

L'influence de la température sur I_{cc} est très souvent négligée.

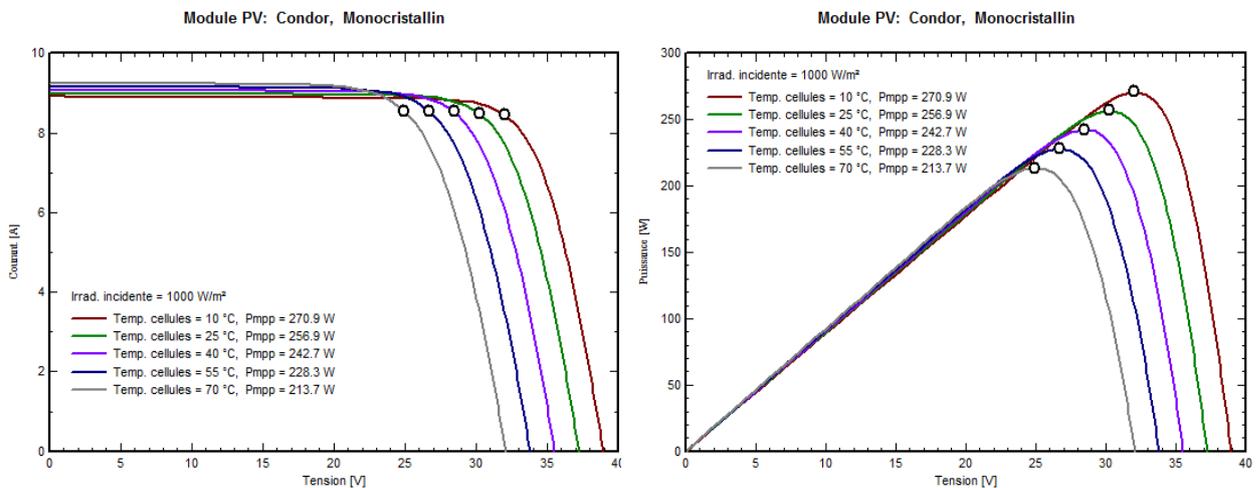


Figure III.9. Influence de la température sur I-V et P-V.

III.2.4. Dimensionnement du système photovoltaïque

Le bon fonctionnement d'un système photovoltaïque est basé sur deux principes, la production d'énergie journalière du système photovoltaïque qui doit toujours être supérieure ou égale aux besoins en énergie journaliers de l'utilisateur d'une part, et l'énergie réellement consommée quotidiennement par l'utilisateur qui devrait toujours rester inférieure ou égale à l'énergie réellement produite (par jour) par le système photovoltaïque.

III.2.4.1. Besoins en énergie électrique

L'objectif visé est d'obtenir la consommation totale moyenne par jour et par période (été, hiver, vacances...). L'énergie totale moyenne nécessaire chaque jour (E), est la somme des consommations énergétiques des divers équipements constituant le système à étudier, (télévision, lampes d'éclairage, appareils électroniques, etc.). Elle est donnée par la relation [51]:

$$E = \sum_i E_i \quad (\text{III.9})$$

Ainsi, la consommation de chaque équipement peut être calculée comme suit:

$$E_i = P_i t_i \quad (\text{III.10})$$

III.2.4.2. Energie électrique fournie par le générateur photovoltaïque

Le dimensionnement d'un système photovoltaïque est basé sur l'évaluation des besoins en énergie électrique de l'utilisateur. Ces besoins peuvent être des charges DC ou AC, ou bien les deux [61,62]. Les étapes à suivre pour le dimensionnement des générateurs sont:

- Calcul de l'énergie journalière consommée: E_j
- Calcul de l'irradiation journalière moyenne: E
- Définition des rendements respectifs des équipements utilisés: η

En appliquant la méthode des rendements, la puissance crête est évaluée par la formule:

$$P_C = \frac{E_j}{E \cdot \eta_{ond} \cdot \eta_{bat} \cdot \eta_{reg} \cdot K_p} \quad (\text{III.11})$$

Avec :

K_p : Coefficient du panneau (égal à 0,8).

$\eta_{ond} \cdot \eta_{bat} \cdot \eta_{reg}$: Rendements respectifs de l'onduleur, de la batterie et du régulateur, d'une valeur moyenne de l'ordre de 0,8.

Le nombre de modules à mettre en série:

$$N_S = V_{inst} / V_M \quad (III.12)$$

Le nombre de branches:

$$N_p = P_C / P_{C.Module} \cdot N_S \quad (III.13)$$

Pour le calcul de la puissance délivrée par le générateur photovoltaïque, Homer utilise la formule:

$$P_{PV} = P_{CMod} \cdot f_{pv} \left[\frac{E_T}{E_{T,STC}} \right] \cdot [1 + \alpha_P (T_C - T_{C,STC})] \quad (III.14)$$

Avec:

f_{pv} : Coefficient de performance

E_T : Rayonnement solaire incident sur le plan du module PV.

$E_{T,STC}$: Rayonnement solaire incident dans les conditions standards.

T_C : Température de la cellule PV dans les conditions standards.

α_P : Coefficient de température de puissance.

Les valeurs moyennes du coefficient de la température pour différents types de modules PV sont consignées dans le tableau III.4.

Tableau III .1. Coefficients de la température [51].

Type du module PV	Silicium polycrystallin	Silicium monocristallin	Silicium hybride	Silicium amorphe	Couche mince SIC
α_P [%/°C]	-0.48	-0.46	-0.30	-0.20	-0.60

III.2.4.3. Dimensionnement du système de stockage d'énergie

Pour réaliser le dimensionnement du parc de batterie, on procède comme suit [63] :

- Détermination du nombre de jour d'autonomie (N_{jA}) dont on souhaite bénéficier.
- Détermination de la profondeur de décharge acceptable par la batterie (D) d'après le type de batterie utilisée.

- Calcul de la capacité C de la batterie en appliquant la formule:

$$C = \frac{E_j \cdot N_{jA}}{\eta_{bat} \cdot D \cdot V_{bat} \cdot (1 - T_L)} \quad (\text{III.15})$$

Où:

D : Décharge maximale admissible par la batterie.

V_{bat} : Tension de la batterie.

$$T_L = 1 - \left(\frac{(75 + T_a)}{100} \right) \quad (\text{III.16})$$

Pour éviter tout risque de détérioration, les constructeurs préconisent des pourcentages de décharge acceptable par la batterie [51, 63, 64]:

- 80% pour les batteries au plomb stationnaires (spécial solaire), soit $D=0.80$.
- 50% pour les batteries au plomb de démarrage (de voiture), soit $D=0.50$.
- 100% pour les batteries cadmium/nickel, soit $D=1.00$.

Le taux 80% de décharge signifie qu'au maximum de décharge, la batterie doit toujours conserver 20% de charge.

III.2.4.4. Dimensionnement du régulateur photovoltaïque

Le choix des paramètres du régulateur se fait comme suit:

- Puissance du régulateur P_{reg} supérieure à P_C .
- Tension du régulateur V_{reg} identique à celle du générateur PV .
- Le régulateur doit supporter une intensité supérieure au courant maximal du champ PV .
- Intensité du régulateur:

$$I_{reg} = P_C / V_{PV} \quad (\text{III.17})$$

III.2.4.5. Principe du choix de l'onduleur

Dans les installations photovoltaïques, le choix de l'onduleur se fait à partir des paramètres suivants [51,64] :

- Puissance de l'onduleur (P_{ond}), supérieure ou égale à celle des charges ($P_{charges}$). Il est conseillé que la puissance nominale de l'onduleur soit environ 2 à 3 fois supérieure à celle des appareils à alimenter ($P_{ond} = Puissance\ des\ charges / \eta_{ond}$).
- Tension d'entrée continue nominale de 12 V, 24 V, 48 V...etc.
- Tension de sortie alternative nominale de 220 V monophasée, 380 V triphasée.
- Fréquence de sortie nominale de 50 Hz
- Rendement nominal au moins de 90%; ($\eta_{ond} = 0.9$)

III.2.4.6. Choix de la tension du réseau

Le choix de la tension nominale d'un système dépend non seulement de la disponibilité du matériel (modules et récepteurs), mais également des niveaux de puissance et d'énergie nécessaires selon le type d'application.

Dans le but de limiter les pertes en ligne, des tensions sont proposées en fonction de la puissance délivrée par l'installation (tableau III.5) [50].

Tableau III .2. Relation tension - puissance

Puissance crête	< 500 W _c	500W _c - 2KW _c	>2KW _c
Tension du système	12 V	24 V	48 V

III.3. Intégration des panneaux PV au bâtiment

Il existe plusieurs modes d'intégration des panneaux PV dans les bâtiments [65-67] :

III.3.1. En toiture

III.3.1.1. Surimposition en toiture

Ce mode de montage consiste à fixer les modules photovoltaïques au-dessus de la toiture (figure III.10). Son avantage est la pose simple et rapide des modules photovoltaïques.



Fig.III.10. Le montage en surimposition.

III.3.1.2. Intégration en toiture

L'intégration en toiture est une solution qui consiste à remplacer la couverture existante pour y installer un système photovoltaïque (figure III.11).



Fig.III.11. Intégration en toiture.

III.3.2. En toit terrasse

III.3.2.1. Membranes d'étanchéité photovoltaïque

Cette intégration a pour but la réalisation de revêtements d'étanchéité photovoltaïques (figure III.12). Elle consiste en l'insertion de laminés souples au silicium amorphe sur des d'étanchéité de différents types (bitume, synthétique, caoutchouc, systèmes bicouches ou monocouches).



Fig.III.12. Membranes d'étanchéité PV.

III.3.2.2. Surimposition en toit terrasse

Elle est réalisée par la fixation des modules photovoltaïques au-dessus d'un toit terrasse par l'intermédiaire d'un bac lesté ou d'un châssis support permettant l'orientation et l'inclinaison des modules (figure III.13). Le rendement est élevé lorsque la face arrière des panneaux est bien refroidie par ventilation naturelle.



Fig.III.13. Surimposition en toit terrasse.

III.3.2.3. Garde-corps de terrasse

Dans ce type de montage, le module PV est intégré dans une armature métallique constituant la structure du garde-corps de terrasse de l'habitat (figure III.14).



Fig.III.14. Garde-corps de terrasse.

III.3.3. Autres implantations

III.3.3.1. Garde-corps de balcon

Le module PV est intégré dans l'armature métallique, réalisant ainsi la structure du garde-corps (figure III.15)



Fig.III.15. Garde-corps de balcon.

III.3.3.2. Brise soleil

Cette solution consiste à intégrer, sur une armature métallique fixée en façade, les modules photovoltaïques au-dessus de baies vitrées. L'avantage de cette position des modules permet d'éviter la pénétration du soleil dans le bâtiment et de surchauffer les locaux (figure III.16).



Fig.III.16. Brise soleil.

III.3.3.3. Bardage

Dans ce cas, des modules photovoltaïques sont utilisés comme peau extérieure des façades pleines (figure III.17).



Fig.III.17. Bardage.

III.3.3.4. Verrière et façade vitrée

Des modules PV bi-verre cristallin ou couches minces sont installés à la place d'une verrière ou d'une façade traditionnelle. Ceci permet de limiter les apports solaires, et d'apporter une fonction esthétique (figure III.18).



Fig.III.18. Verrière et façade vitrée.

III.4. Principe de l'autoconsommation

Dans le cas de d'autoconsommation, l'électricité photovoltaïque produite est soit consommée par le producteur, sans vente d'électricité, soit elle permet de compenser financièrement une électricité consommée antérieurement [68].

Le taux d'autoconsommation correspond à la part de la production d'électricité photovoltaïque qui est instantanément consommée sur place.

$$\text{Autoconsommation (\%)} = \text{Production consommée sur place} / \text{production totale}$$

Le taux d'autoproduction correspond à la part de consommation d'électricité qui est produite instantanément sur place, par l'installation photovoltaïque.

$$\text{Autoproduction}(\%) = \text{Consommation produite sur place} / \text{consommation totale}$$

Il existe plusieurs solutions techniques permettant de réaliser l'autoconsommation :

III.4.1. Vente totale

L'installation est raccordée au réseau via une nouvelle ligne et un compteur de production indépendant et l'ensemble de l'électricité est vendue (figure III.19).

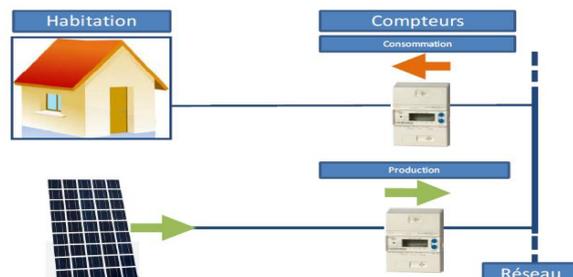


Fig.III.19. Vente totale.

III.4.2. Vente excédentaire

L'installation est raccordée sur la ligne existante avec l'ajout d'un compteur de production. Une partie de l'électricité est autoconsommée, le reste est vendu (figure III.20).

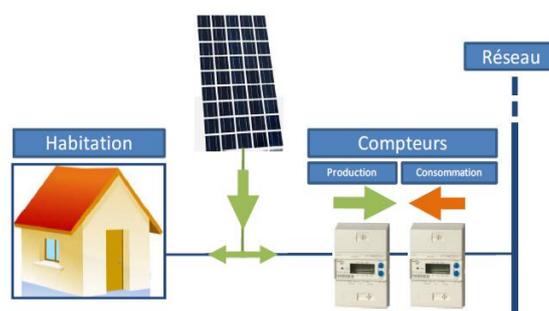


Fig.III.20. Vente Excédentaire.

III.4.3. Autoconsommation totale sans stockage

L'installation est raccordée sur la ligne existante sans ajout de compteur. Une partie de l'électricité est autoconsommée, le reste est injecté gratuitement au réseau (figure III.21).

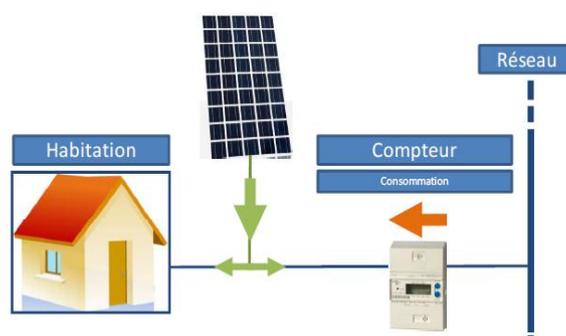


Fig.III.21. Autoconsommation totale sans stockage.

III.4.4. Autoconsommation totale avec stockage partiel

L'installation PV est raccordée sur le réseau sans ajout de compteur. La majeure partie de l'électricité est autoconsommée grâce au stockage par batterie pendant les fortes périodes de production, l'autre (minime) est injectée gratuitement au réseau (Figure III.22).

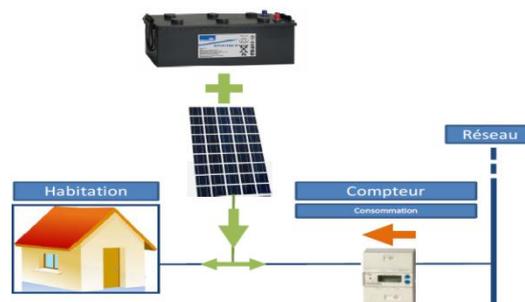


Fig.III.22. Autoconsommation totale avec stockage partiel.

III.4.5. Autonomie

L'installation n'est pas raccordée au réseau. Le nombre de panneaux et de batteries est calculé pour répondre à l'ensemble des besoins tout au long l'année.

III.5. Optimisation d'un module photovoltaïque

L'intérêt des chercheurs dans le domaine de l'optimisation des systèmes solaires est croissant. Pour l'estimation et l'optimisation des différents systèmes d'énergie solaire, les techniques stochastiques (algorithme génétique (AG), neurones artificiels réseaux (NAR), optimisation de colonie de fourmis(OCF), optimisation par essaim de particules (PSO), etc. sont utilisées [31]. Dans le cadre de notre travail, l'algorithme OCF, sera utilisé pour optimiser l'angle d'inclinaison d'un panneau PV qui reste le paramètre le plus important pour capter le maximum de rayonnement solaire.

III.5.1. Méthode d'optimisation de colonie de fourmis (OCF)

Les algorithmes de colonies de fourmis (Ant Colony Optimization, ou *ACO*) sont inspirés du comportement des fourmis. Initialement proposé par Marco Dorigo *et al*, dans les années 1990, pour la recherche de chemins optimaux dans un graphe, le premier algorithme s'inspire du comportement des fourmis recherchant un chemin entre leur colonie et une source de nourriture. L'idée originale s'est depuis diversifiée pour résoudre une classe plus large de problèmes et plusieurs algorithmes ont vu le jour, s'inspirant de divers aspects du comportement des fourmis [68].

L'algorithme général de notre travail est relativement simple, et repose sur un ensemble de fourmis, chacune parcourant un trajet parmi ceux possibles. À chaque étape, la fourmi choisit de passer d'un nœud à un autre en fonction de quelques règles [69].

Une fourmi k placée sur un nœud i à l'instant t , va choisir son nœud j de destination en fonction de la visibilité η_{ij} de ce dernier et de la quantité de phéromones τ_{ij} déposée sur l'arc reliant ces deux nœuds. Ce choix sera réalisé de manière aléatoire, avec une probabilité de choisir le nœud j , selon la relation suivante :

$$P_{ij}^k(t) = \frac{(\tau_{ij}(t))^\alpha \eta_{ij}^\beta}{\sum (\tau_{il}(t))^\alpha \eta_{il}^\beta} \quad (\text{III.18})$$

α et β sont deux paramètres qui contrôlent l'importance relative entre phéromones et visibilité. Ainsi si α est égal à 0, le choix se fera uniquement en fonction de la visibilité (si β est différent de zéro).

A la fin de chaque cycle (chaque fourmi a parcouru les n sommets qui composent le graphe), les variables des phéromones sont mises à jour selon la formule :

$$\tau_{ij}(t+n) = \rho \tau_{ij}(t) + \Delta \tau_{ij}(t) \quad (\text{III.19})$$

Où $\rho \in [0, 1[$, est un coefficient qui définira la vitesse d'évaporation des phéromones sur les arcs entre l'instant t et l'instant $t+n$, et $\Delta \tau_{ij}(t)$ la quantité de phéromone déposée par les fourmis dans ce même intervalle de temps sur l'arc (i, j) .

Le choix de ρ est important. En effet, si ρ se rapproche trop de l'unité, on observe un effet de stagnation des phéromones sur les arcs, ce qui implique des inconvénients tel que le fait de voir les mauvaises solutions persister.

De même que choisir $\rho \sim 0$ implique une évaporation trop rapide des phéromones, ce qui, par conséquent, amène la fourmi à un choix dépendant uniquement de la visibilité des nœuds.

La quantité de phéromones déposée par cette fourmi sur l'arc (i, j) dans ce même intervalle de temps est définie par la relation :

$$\Delta \tau_{ij}^k(t) = \begin{cases} \frac{Q}{L_k(t)} \\ 0 & \text{sinon} \end{cases} \quad (\text{III.20})$$

Où: $L_k(t)$ est la longueur parcourue (du parcours)

Q , est une constante.

Il est aisé de noter que les phéromones sont régulées en fonction de la qualité de la solution obtenue. L'arc sera d'autant plus à jour en phéromones que $L_k(t)$ est faible. La formule de mise à jour des phéromones $\Delta\tau_{ij}(t)$ est définie comme suit [70]:

$$\Delta\tau_{ij}(t) = \sum_{k=1}^m \Delta\tau_{ij}^k(t) \quad (\text{III.21})$$

Le but de ce travail étant de trouver l'angle optimal de l'inclinaison d'un module photovoltaïque, le calcul se fera en recherchant les valeurs pour lesquelles le rayonnement solaire incident sur la surface du module est maximal pour un jour particulier ou une période spécifique. Pour cela le modèle théorique de Munner est choisi pour estimer le rayonnement solaire incident sur une surface inclinée, et la méthode d'optimisation de colonie de fourmis(OCF) pour trouver l'angle d'inclinaison optimale durant l'année est utilisée.

III.5.1.1. Algorithme de calcul de la méthode OCF

Dans ce qui suit, les différentes étapes de l'algorithme au cours du temps seront précisées [68-71]:

- **Initialisation de l'algorithme:** Les éléments s'agencent de la manière suivante au début de l'algorithme :
 - Les m fourmis sont réparties aléatoirement sur les n nœuds.
 - Pour chaque fourmi, la liste qui modélise sa mémoire contient son nœud de départ.
 - Les pistes de phéromones sont initialisées comme suit : $t_{ij}(0) = c$. c étant une constante positive très petite, mais qui ne peut être nulle (sinon, il y aurait un problème lors du calcul de l'équation III.18).
- **Fin d'un cycle:** Après n itérations, nous sommes à l'instant t, toutes les fourmis ont terminé leur tour, chacune a une liste "mémoire" pleine et est revenue à son propre nœud de départ. À ce moment :
 - Pour chaque fourmi la valeur $L_k(t)$ est calculée.
 - Les variables $\tau_{ij}^k(t)$ sont calculées conformément à la formule III.18
 - Les variables de phéromone $\tau_{ij}(t)$ sont mises à jour suivant la relation III.19

On observe quelle fourmi a trouvé le tour de longueur minimal (on recherche la fourmi k telle que $k = \min_{k=1}^m L_k(t)$). Si ce tour le meilleur tour jusqu'ici, on le mémorise.

- Les mémoires des fourmis sont effacées.

- Les fourmis recommencent un nouveau tour, toujours au départ du nœud sur lequel, elles avaient été placées au début de l'algorithme.
- **Fin de l'algorithme:** On arrête l'algorithme après un nombre de cycles égal à une constante NC_{max} .

III.6. Résultats et discussions

Le placement des panneaux photovoltaïques est très important pour une utilisation maximale de leur capacité. Pour récupérer le maximum d'énergie solaire il faut varier l'angle d'inclinaison des panneaux pendant toute l'année. L'angle optimal dépend de plusieurs facteurs tels que l'altitude, la latitude et les conditions atmosphériques.

La quantité de rayonnement solaire (puissance solaire par unité de surface reçue en un jour), varie avec les conditions climatiques, telles que le passage d'un nuage, la brume, le brouillard etc. Du fait que le rayonnement instantané est variable, l'énergie solaire quotidienne obtenue est calculée à partir de l'intégrale de la courbe de rayonnement en fonction du temps. Ces données sur l'énergie solaire sont utilisées, pour la conception des systèmes photovoltaïques.

Le réglage de l'angle d'inclinaison quotidiennement ou mensuellement sur le site choisi est contraignant et très difficile. La solution à ce problème consiste à choisir un angle d'inclinaison optimal qui fournit l'énergie solaire maximale. L'optimisation de l'angle d'inclinaison d'un capteur PV, estimé à partir d'un modèle théorique de l'éclairement solaire global sur une surface inclinée, est entreprise à l'aide de la méthode OCF.

Les résultats obtenus sont présentés sur la figure III.23. Nous pouvons noter que l'angle d'inclinaison optimal pour la ville de Ghardaïa, varie entre 0 (horizontal) et 60 degrés. Cet angle sera approximativement de 25 degrés pour le printemps, de 12 degrés pour l'été et de 40 et 50 degrés respectivement en automne et en hiver.

Le rayonnement reçu à l'horizontale (0°) et sous un angle optimal de 32° (calculé par la méthode OCF), pour la ville de Ghardaïa est illustré par la figure III.24.

L'examen des courbes de cette dernière figure permet d'observer que l'irradiation maximale reçue est celle en rapport avec l'angle d'inclinaison optimal, déterminé à partir de la figure III.23 ce qui démontre clairement l'utilité, voire la nécessité, de l'optimisation de l'angle d'inclinaison d'un panneau.

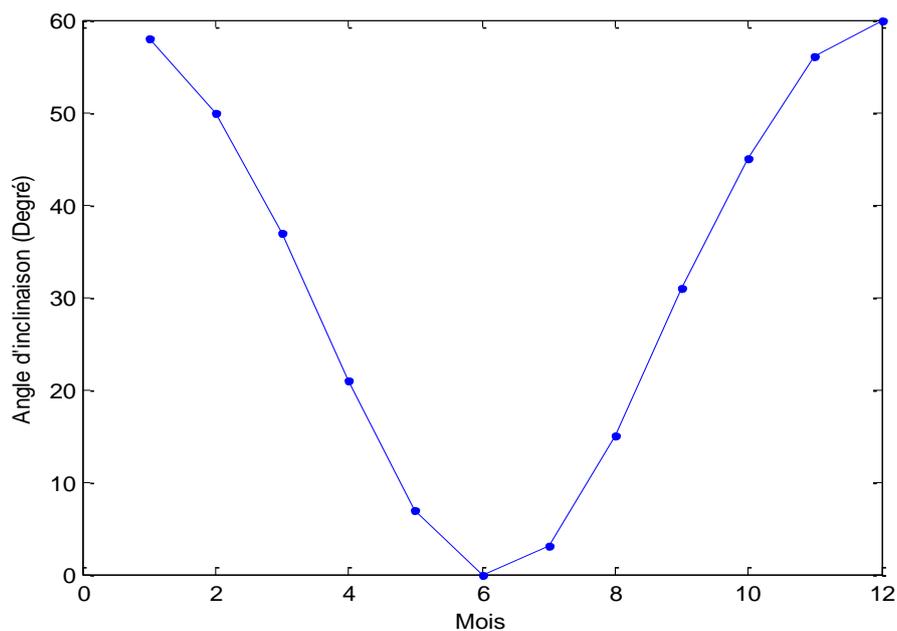


Fig.III.23. Angle d'inclinaison optimal annuel (modèle de Munnier).

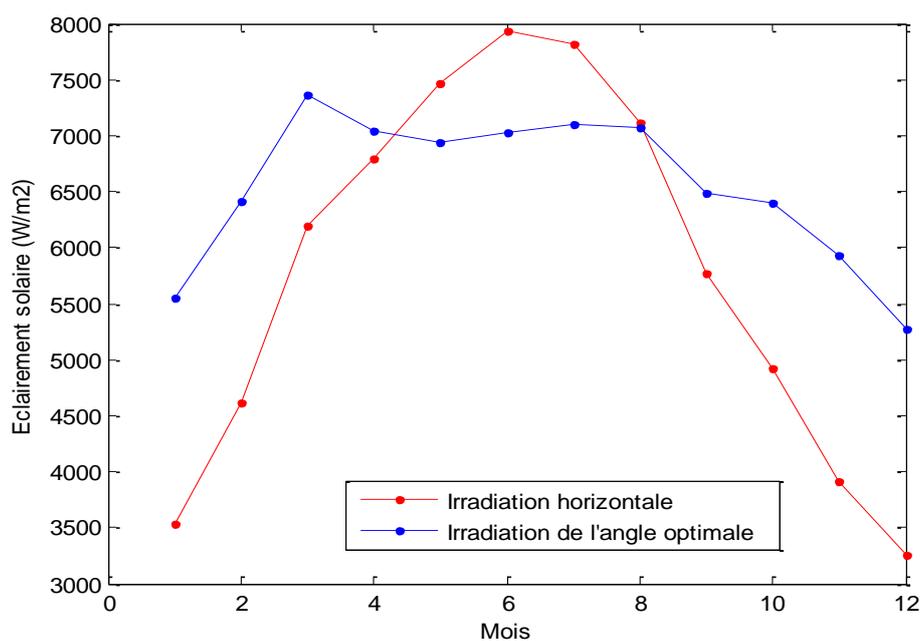


Fig.III.24. Irradiance mensuelle reçue sur les plans horizontal et incliné de manière optimale (modèle de Munnier).

Les valeurs de l'éclairement solaire global sur un plan incliné d'un angle optimal calculé à partir du modèle de Munnier pour chaque mois de l'année sont représentées par l'ensemble des courbes de la figure III.25. La puissance générée à chaque heure de la journée est déterminée en faisant la moyenne de la puissance générée pendant cette heure.

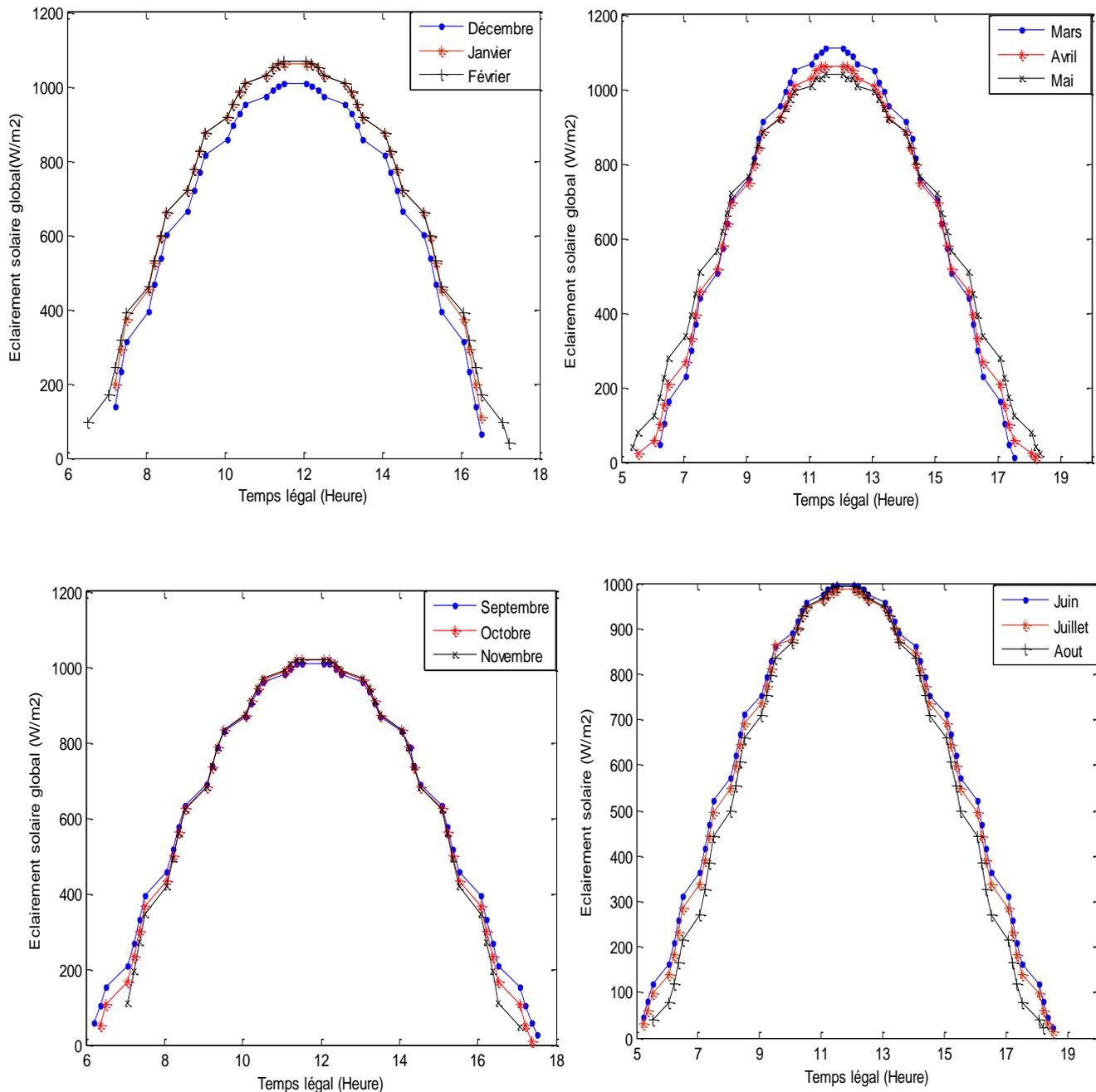


Fig.III.25. Irradiance moyenne horaire reçue sur un plan incliné d'un angle optimal de 32° (modèle de Munner) pour chaque mois de l'année 2015.

Nous pouvons remarquer que l'éclairement solaire oscille autour de 1000 W/m^2 , tout au long de l'année, atteint une valeur maximale de 1100 W/m^2 au cours du mois de Mars et minimale (inférieure à 1000 W/m^2) au mois de Décembre.

L'irradiation globale reçue sur la surface unitaire du module PV, au cours de l'année est illustrée par la figure III.26. De Mars à Août, l'irradiance moyenne horaire est estimée à plus de 200 kW / m² / mois, le maximum d'irradiation est atteint au mois de Mars, (figure III.25).

Pendant le reste de l'année, l'irradiation reçue est inférieure à cette valeur et atteint un minimum au cours du mois de Décembre.

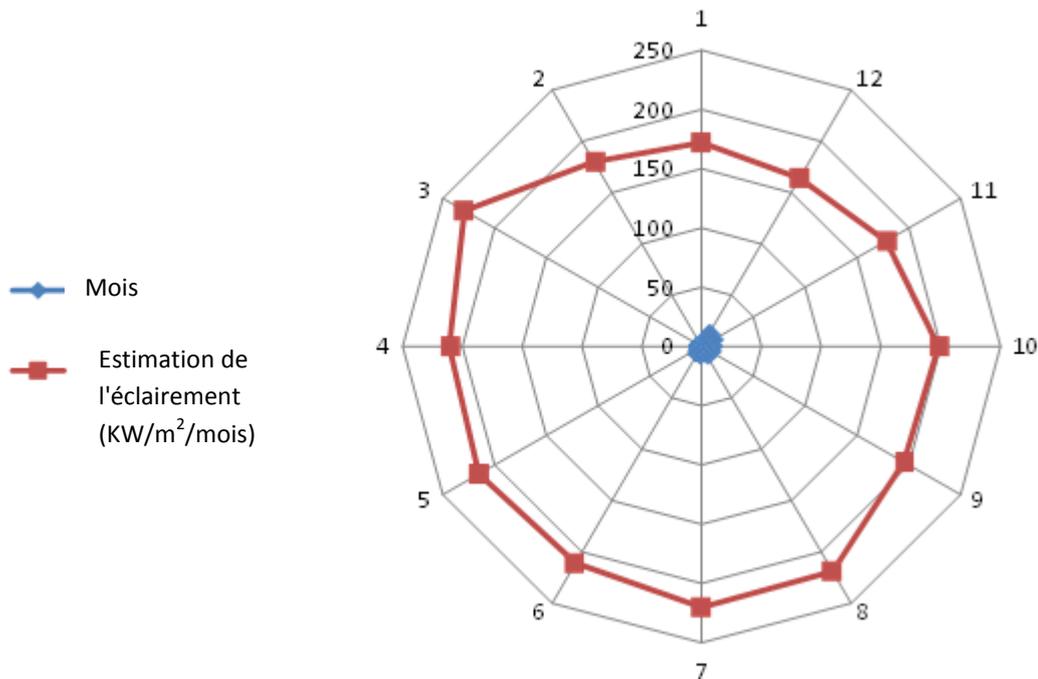


Fig.III.26. L'éclairement globale reçue sur la surface du module PV au cours de l'année.

L'observation de la figure III.27 permet de constater que l'énergie solaire générée par les cellules photovoltaïques qui est étroitement liée à l'énergie disponible, est variable résultant du caractère intermittent et aléatoire de l'énergie solaire. Il n'est donc pas possible de dimensionner les systèmes photovoltaïques en se basant uniquement sur l'équilibre entre les puissances générée (générateur) et consommée (utilisateur), mais plutôt entre les énergies produite et consommée, sur une période donnée (en général par jour).

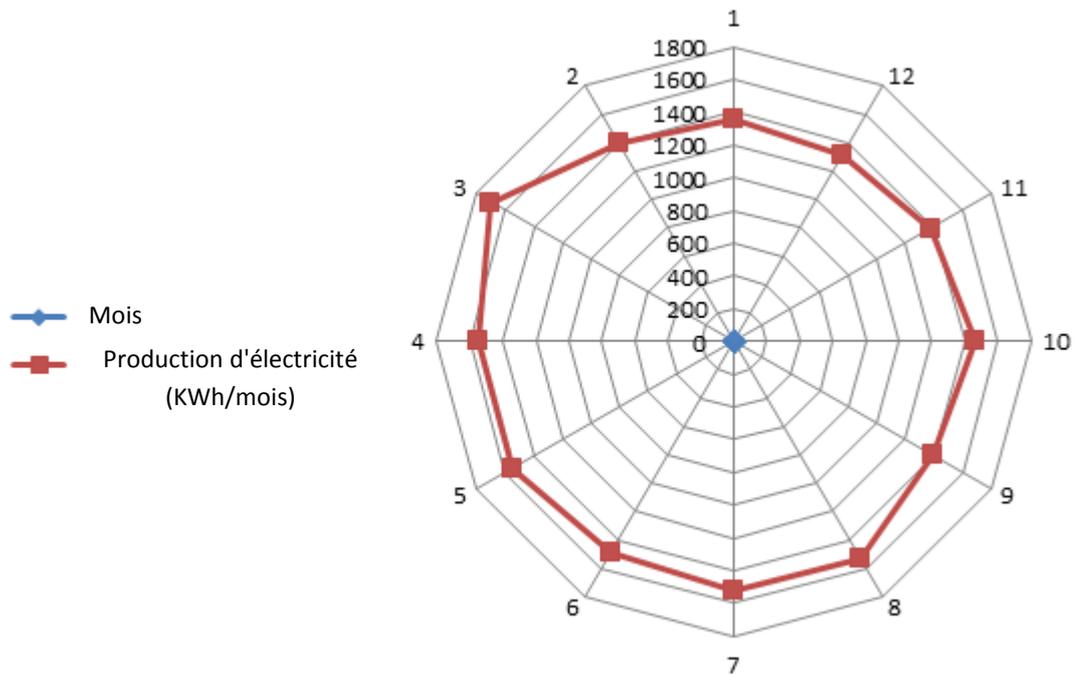


Fig.III.27. Production d'électricité moyenne mensuelle.

III.7. Conclusion

Dans ce chapitre de la thèse une étude théorique des composants d'un système photovoltaïque pour l'habitat a été menée. La modélisation, et le dimensionnement des modules PV ont été abordés. Dans l'objectif d'améliorer leur performance, l'optimisation de l'angle d'inclinaison d'un module PV a retenu notre attention

Les valeurs optimales de l'angle d'inclinaison des panneaux photovoltaïques à Ghardaia (Algérie) ont été déterminées en utilisant l'algorithme d'optimisation de colonie de fourmis (OCF). Le modèle de Muneer a été utilisé pour calculer le rayonnement solaire sur des surfaces horizontale et inclinée.

Chapitre IV

Matériaux à changement de phase

IV.1. Introduction

Le stockage thermique par changement de phase est une technologie innovante et prometteuse en matière d'économie d'énergie. C'est un domaine de recherche qui a débuté avec le Dr. Telkes dans les années 40 [73,74]. Les premières études concernant la mise à profit du changement de phase solide- liquide dans le bâtiment datent du début des années 80 [75].

La nouveauté réside aujourd'hui, dans l'utilisation de matériaux à changement de phase (MCP) comme batterie de stockage. Ce sont des substances chimiques capable d'absorber ou de libérer plus tard de grandes quantités d'énergie thermique pendant un changement de phase, (solide à liquide et/ou vice versa).

Les principaux avantages de ces nouveaux matériaux sont une large gamme de température de fusion qui permet d'adapter la technologie à divers procédés, une excellente conduction et une disponibilité associées à des temps de charge, et de décharge très performants.

Dans ce chapitre, les différents types de stockage de l'énergie thermique par changement de phase, et quelques applications des MCP dans les bâtiments sont successivement présentés

IV.2. Stockage de l'énergie thermique

On distingue deux techniques principales de stockage thermique [75]:

- Par chaleur sensible ; dans ce cas, la température des matériaux de stockage varie avec la quantité d'énergie stockée.
- Par chaleur latente, un procédé qui utilise l'énergie emmagasinée ou restituée au cours d'un changement d'état d'un corps (solide, liquide, gaz).

Le stockage par chaleur sensible a quelques avantages, essentiellement la disponibilité des matériaux de stockage avec des prix acceptables. Néanmoins des inconvénients majeurs sont recensés tels que, la nécessité de systèmes volumineux et une grande marge de température de fonctionnement.

Le stockage par chaleur latente offre plus d'avantages que le précédent, notamment:

- Une faible plage de température de fonctionnement.
- Une grande capacité de stockage par unité de masse ou de volume.
- Un meilleur contrôle thermique des systèmes.

Cependant, il présente lui aussi, quelques inconvénients, principalement une faible conductivité thermique et un coût relativement cher.

Le phénomène de stockage comporte trois étapes:

- Stockage par chaleur sensible dans le MCP.
- Stockage par chaleur latente au début de la fusion.
- Stockage simultané par chaleurs sensible et latente dans le MCP liquide.

Quant au déstockage il comporte quatre étapes:

- Déstockage par chaleur sensible dans le MCP liquide.
- Déstockage par chaleur sensible au début de la re-solidification du MCP.
- Extraction de la chaleur du MCP par refroidissement de celui-ci et de la phase solide.
- Déstockage par chaleur sensible de la phase liquide.

IV.2.1. Stockage par chaleur sensible

Il est réalisé par un apport thermique qui augmente la température du milieu récepteur (liquide ou solide). Le déstockage de la chaleur entraînera une diminution de la température de ce milieu. À pression constante, pour l'élévation de la température de T_1 à T_2 , d'un corps de masse m et de chaleur spécifique $C(T)$, l'énergie stockée sous forme sensible est donnée par [75]:

$$H_2 - H_1 = \int_{T_1}^{T_2} m \cdot c(T) dT \quad (\text{IV.1})$$

Afin de simplifier le problème, la capacité thermique massique est supposée indépendante de la température ($C(T) = \text{constante}$).

L'équation (IV.1) devient alors:

$$H_2 - H_1 = m \cdot c \cdot (T_2 - T_1) \quad (\text{IV.2})$$

Le stockage par chaleur sensible dépend du milieu de stockage, en particulier de son état physique. On définira alors:

- Le stockage par un fluide (eau, huile, sels fondus).
- Le stockage par un solide (pierre, métaux,...).

IV.2.2. Stockage par chaleur latente

Le stockage par chaleur latente consiste à emmagasiner de l'énergie thermique qui, par la suite, va provoquer une variation de température et un changement de phase du matériau. Lors de la restitution de l'énergie thermique, on observera le phénomène de changement de phase.

Ce type de stockage est fort attractif du fait qu'il permet de stocker une grande quantité d'énergie, (à titre d'exemple, l'énergie requise pour fondre 1 kg de glace est 80 fois celle nécessaire pour augmenter la température de 1 kg d'eau de 1°C).

Il faut noter que:

- La chaleur latente est beaucoup plus importante que la chaleur sensible.
- Les points de fusion dépendent des corps utilisés; ce critère permet d'utiliser des matériaux différents en fonction des températures souhaitées. Ces matériaux sont les Matériaux à Changement de Phase (MCP).

Dans le cas d'un changement d'état (fusion), la quantité de chaleur mise en jeu s'écrit:

$$Q = m (H_2 - H_1) = m \Delta H_f \quad (\text{IV.3})$$

Où, ΔH_f est l'enthalpie spécifique de fusion.

Généralement, il faut porter le matériau initialement à T_i à sa température de fusion T_F .

On écrit :

$$Q = m (H_2 - H_1) = m.c.(T_2 - T_1) + m \Delta H_f \quad (\text{IV.4})$$

IV.3. Matériaux à Changement de Phase (MCP)

Les matériaux à changement de phase (MCP) ont pour particularité de pouvoir stocker de l'énergie sous forme de chaleur latente. La chaleur est absorbée ou restituée lors du passage de l'état solide à l'état liquide (ou vice versa). Leur principe de fonctionnement est illustré par la figure IV.1.

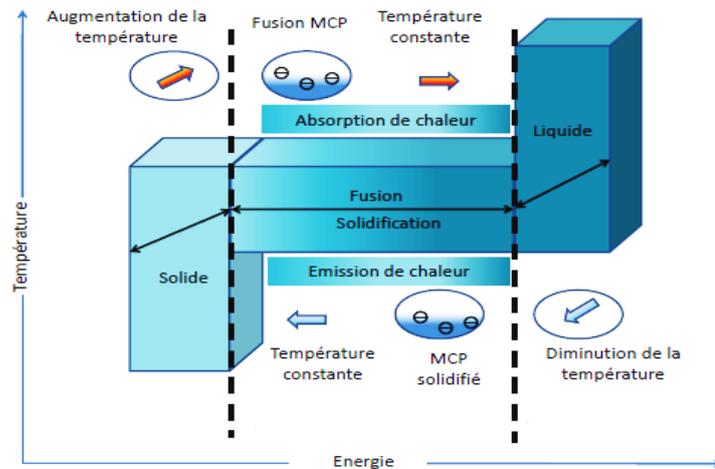


Fig.IV.1. Principe de fonctionnement des matériaux à changements de phase [76].

Trois types de matériaux sont utilisés pour les MCP solide-liquide, la paraffine (organique), les acides gras (organiques) et les hydrates salins (inorganiques) [76].

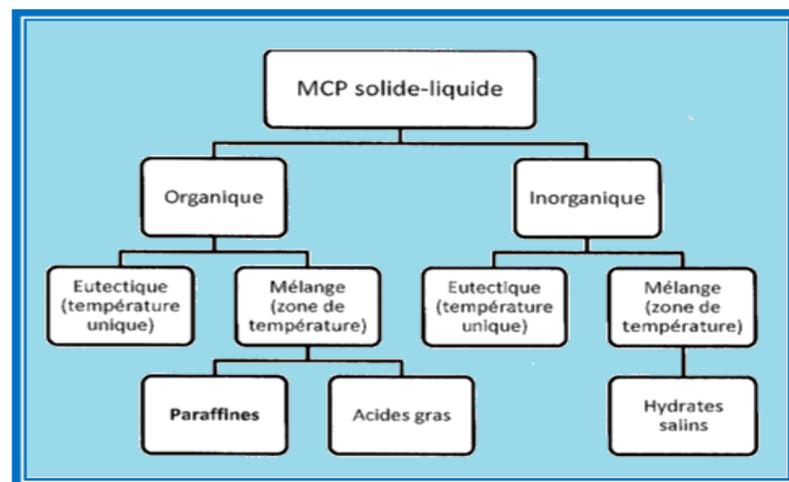


Fig.IV.2. Classification des matériaux à changement de phase.

L'utilisation de la paraffine est la plus courante, les hydrates salins étant délaissés du fait de leur toxicité, de leur mauvaise transition de phase et de leur propension à la surfusion.

L'élaboration relativement récente des encapsulants pour les MCP a permis des applications innovantes de ces matériaux comme masse thermique interactive dans un bâtiment.

IV.4. Application des MCP dans les bâtiments

Les MCP sont utilisés dans les enveloppes de bâtiment pour leur bonne performance thermique et leur stabilité pendant la fusion et la solidification. Intégrés à l'enveloppe du bâtiment (murs, toit, planchers), ces matériaux sont utilisés pour les chauffages solaires passif et actif des bâtisses et pour le refroidissement nocturne (Figure IV.3).

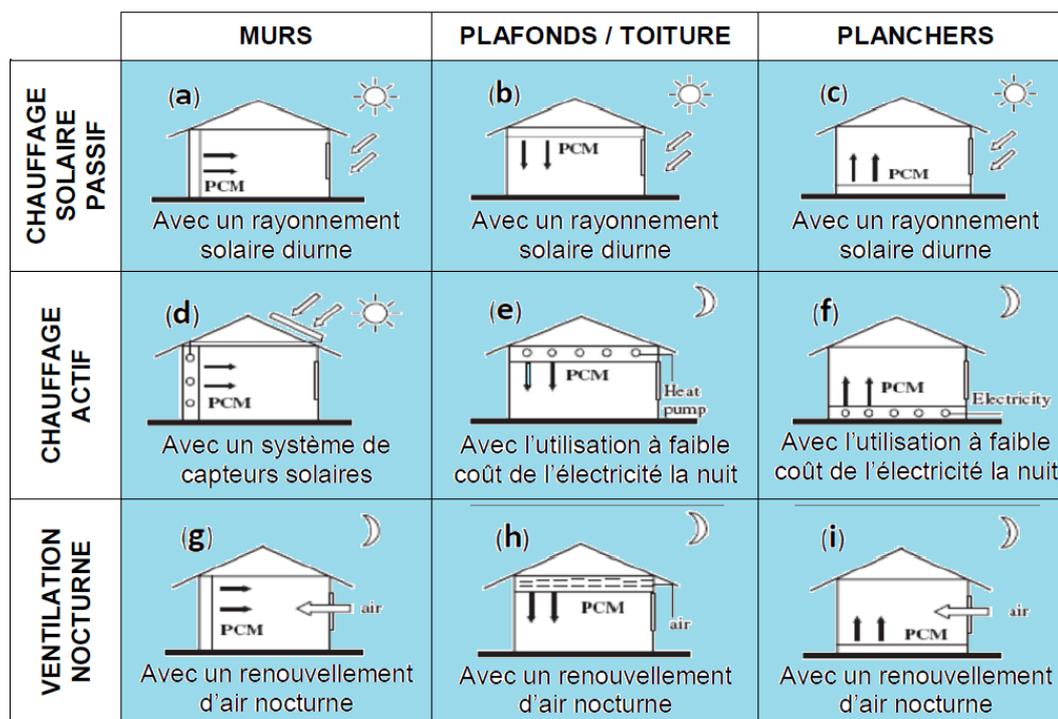


Fig.IV.3. Quelques dispositions de MCP dans le bâtiment [77].

Ainsi :

- Dans le cas de l'utilisation d'un système de capteur solaire, un élément en MCP peut stocker de l'énergie solaire au cours de la journée pour la restituer durant la nuit, permettant ainsi le maintien du confort thermique de la pièce (Figure IV.3 a-b-c-d).
- Avec une pompe à chaleur ou un système de chauffage électrique au niveau du sous-sol, l'enveloppe en MCP peut stocker de la chaleur pendant la nuit pour qu'elle soit utilisée pour le chauffage durant la journée, diminuant ainsi la charge de chauffage de l'espace.
- Le déplacement de la consommation électrique pendant les périodes de pointe aux périodes hors pointe, permet ainsi un meilleur profit économique (Figure IV.3 e-f).

- Un système de ventilation nocturne avec une l'enveloppe en MCP permet le stockage du froid. En effet, lorsque la température extérieure est inférieure à celle de l'air intérieur, le système de ventilation se déclenche pour stocker le froid extérieur au niveau de l'enveloppe en MCP pour être par la suite décharger pendant la journée, diminuant ainsi, la charge de refroidissement (Figure IV.3 g-h-i).

Deux méthodes d'utilisation courantes des MCP dans les bâtiments, l'intégration directe et l'encapsulation avant intégration (Figure IV.4), sont recensées dans la littérature [75].

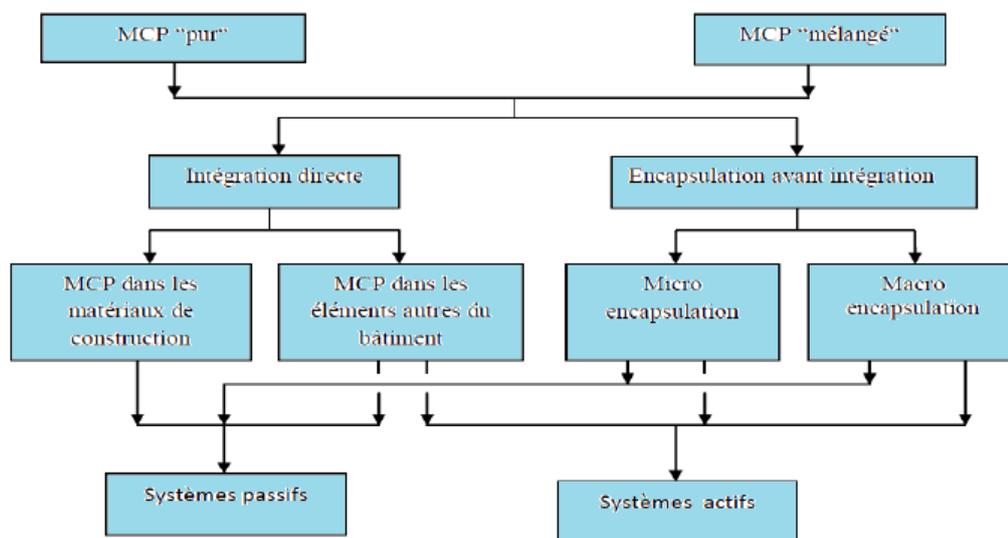


Fig.IV.4. Différents modes d'utilisation des MCP dans le bâtiment [75].

L'intégration directe des MCP dans l'enveloppe du bâtiment est courante dans le bâtiment passif, du fait que la surface d'échange de chaleur est grande. Les MCP sont capables de combiner les fonctions de stockeur de chaleur et éléments de construction. Ils contribuent à l'amélioration du rafraîchissement des résidences. Les structures les plus fabriquées sont les plaques de plâtre, les enduits, les murs trombes à base de MCP, et les blocs de béton [75].

Quelques travaux, axés sur l'intégration des MCP dans les parois de type murs et/ou au niveau de la toiture et leurs utilisations dans les protections solaires sont présentés dans ce qui suit.

IV.4.1. Intégration des MCP dans les parois

Les plaques de plâtres-MCP sont fabriquées en général, soit par immersion de la plaque de plâtre dans le MCP, soit par ajout du MCP lors de la fabrication de la plaque de plâtre. Ces plaques de plâtre-MCP sont fixées sur les murs sous la forme d'un sandwich composé d'un isolant (le plus souvent en polystyrène) et du plâtre-MCP (Figure IV.5). Les sociétés Dupont de Nemours et BASF proposent ces produits et les ont déjà appliqués dans des bâtiments existants [76].



Fig.IV.5. Intégration des MCP dans les parois [76].

De nombreuses études et diverses applications concernant l'intégration d'un MCP à un mur vertical, existent dans la littérature:

Athienitis et al [77] ont étudié expérimentalement et numériquement le transfert thermique permanent dans un mur avec panneaux en plâtre contenant des MCP. Un modèle numérique basé sur les différences finies avec un schéma de type explicite a été également développé. Les auteurs ont montré que l'utilisation des MCP pouvait conduire à une réduction de la température intérieure de 4°C.

Bourdeau [79] a étudié deux murs de béton avec matériau à changement de phase (le chlorure de calcium hexahydraté ayant une température de fusion de 29°C). Les résultats ont conduit à la conclusion qu'un mur de 8 cm avec MCP a une meilleure performance thermique qu'un mur de 40 cm de béton.

Neepér [80] a examiné le comportement thermique de parois imprégnées par des MCP et situées sur la façade interne. La paroi est soumise à la variation journalière de la température ambiante.

L'objectif de cette investigation est de fournir des directives utiles pour le choix optimal d'un MCP [80]. L'auteur a montré expérimentalement que dans la plupart des cas, le stockage maximal d'énergie correspond à une valeur de la température de fusion de MCP proche de la température ambiante moyenne. Le stockage d'énergie diurne diminue si la transition de changement de phase se produit sur une plage de températures de (10°C). Dans la pratique, il peut être limité à 300–400 kJ / m², même si le panneau mural a une plus grande capacité latente. Les implications de ces résultats pour les expériences en salle d'essai sont discutées.

Kuroki [81] a comparé numériquement les effets d'une intégration de MCP couplé à la VMC (ventilation) ou passivement dans l'enveloppe. Un couplage avec la VMC permet d'amortir les pics de température en journée. L'intégration de MCP sans la VMC (intégration passive dans l'enveloppe) a un effet différent. En effet, le changement de phase permet d'emmagasiner progressivement les quantités de chaleur, ayant ainsi un effet direct sur l'ambiance intérieure. Par contre il est nécessaire de sur-ventiler la nuit pour cristalliser le MCP.

Ahmed [82] dans le cadre de ses travaux de thèse de doctorat, a porté un intérêt à des parois réalisées à partir de panneaux commerciaux (polycarbonate) remplies avec des MCP conditionnés dans des granulats, ou des MCP purs. Trois parois composites formées par des panneaux d'isolant et de panneaux en polycarbonate ont été étudiées :

- 1^{ère} paroi: un panneau en polycarbonate placé du côté intérieur et un panneau en isolant placé, du côté extérieur.
- 2^{ème} paroi: un panneau en polycarbonate placé du côté extérieur et un panneau en isolant placé du côté intérieur.
- 3^{ème} paroi: un panneau en polycarbonate placé entre deux panneaux d'isolants.

L'auteur a montré que l'utilisation des MCP purs, ainsi que la détermination de leur épaisseur optimale permettent de garantir un meilleur confort thermique. Par ailleurs, Il a noté que la configuration d'une paroi légère doit prendre en compte les position des MCP et de l'isolant.

Shilei et al [83] ont examiné l'effet sur le confort du bâtiment, d'un panneau plâtre-MCP situé en contact direct avec l'ambiance d'une cellule-test, chauffée par un radiateur électrique. L'analyse de la température de fusion du MCP et la paroi plâtre-MCP par calorimétrie différentielle à balayage (DSC), et une étude comparative de cellules-test dans les

conditions climatiques d'hiver au nord-est de la Chine, ont montré que les parois plâtre-MCP peuvent amortir les fluctuations de température de l'air ambiant interne et réduire les pertes de chaleur, et ont par conséquent la capacité de stocker la chaleur pour améliorer le confort thermique.

Zhou et al [84] ont porté une attention aux performances de deux parois contenant du MCP, l'une constituée d'un mélange plâtre-MCP et l'autre de plâtre pur entouré par un MCP stabilisé par plaques (SSPCM), d'un bâtiment solaire passif situé à Beijing. Les auteurs rapportent que les deux types de mélange plâtre-MCP et plâtre-SSPCM, réduisent efficacement les fluctuations de la température interne, respectivement de 46% et 56%. Ainsi, le plâtre- SSPCM répond plus rapidement que le mélange plâtre-MCP.

Haghshenaskashani et al [85] ont montré numériquement la possibilité de remplir le vide des briques de construction par des matériaux à changement de phase (MCP n-octadécane) pour améliorer leurs performances thermiques.

Cabeza et al [86] ont étudié les principaux effets des MCP micro-encapsulés mélangés avec du ciment sur les performances thermiques d'une petite cabine. Le MCP commercial de Micronal PCM (BASF) dont la température de changement de phase est de 26°C et l'enthalpie de 110 kJ·kg⁻¹ a été utilisé pour cette expérimentation. Une comparaison avec un mur traditionnel, a montré que le stockage de l'énergie thermique pour le mélange (MCP et béton) a une meilleure inertie thermique et qu'il permet des fluctuations de températures réduites.

Pasupathy et al [87] ont fourni une nouvelle méthode pour améliorer l'effet tampon thermique et l'isolation thermique, pour des conditions climatiques données en utilisant la méthode d'attachement dans le cas de deux MCP consécutifs, ayant des températures de fusion différentes et intégrés convenablement à l'enveloppe des bâtiments.

Kuznik et al [88,89] en intégrant des plaques de DuPont Nemours sur les parois latérales et au niveau du plafond d'un bureau du bâtiment HELIOS à Lyon, ont montré que l'utilisation des MCP induit un gain de température qui peut dépasser 3°C par rapport à un bureau sans MCP.

Les enduits à base de MCP existent sous la forme d'un enduit prédosé (prêt-à-gâcher). Ils sont appliqués sur une épaisseur d'environ 15 mm. Sur le plan expérimental, de nombreuses mesures ont été effectuées sur deux cellules ayant une surface de 9 m² chacune. Chacune d'entre elles comportait une surface vitrée de 3 m², orientée au sud.

L'une d'entre elles était revêtue d'enduit à MCP et l'autre avec un enduit traditionnel, de même épaisseur (1,5 cm.) Les mesures de températures ont pu être effectuées pour différentes périodes d'ensoleillement. Les résultats ont démontré que les écarts de température sont de l'ordre de 3 °C entre les deux cellules en ce qui concerne la face interne de l'enveloppe de la cellule. Au niveau du climat intérieur des cellules, une différence de température de 1°C à 1.5 °C entre les deux cellules a été mesurée pour la température maximale journalière atteinte lors des périodes chaudes et/ou très ensoleillées d'été [77].

IV.4.2. Murs Trombe à base de MCP

Les murs Trombe à base de MCP sont composés d'un mur de maçonnerie ordinaire contenant des MCP espacés de 20 cm environ et d'une couche de verre ou d'un vitrage en plastique (Figure IV.6). L'une des premières recherches fut menée à la fin des années 1970. L'idée consistait à comparer, en l'absence de toute circulation d'air naturelle, des murs Trombe avec des matériaux performants à stockage par chaleur sensible et latente.

Les résultats expérimentaux ont montré que, pour une épaisseur de 1/5 et un poids de 1/12 d'un mur traditionnel, l'utilisation de certains MCP dans un mur Trombe permet d'avoir une enveloppe légère avec les mêmes performances de stockage thermique que la maçonnerie traditionnelle [77].

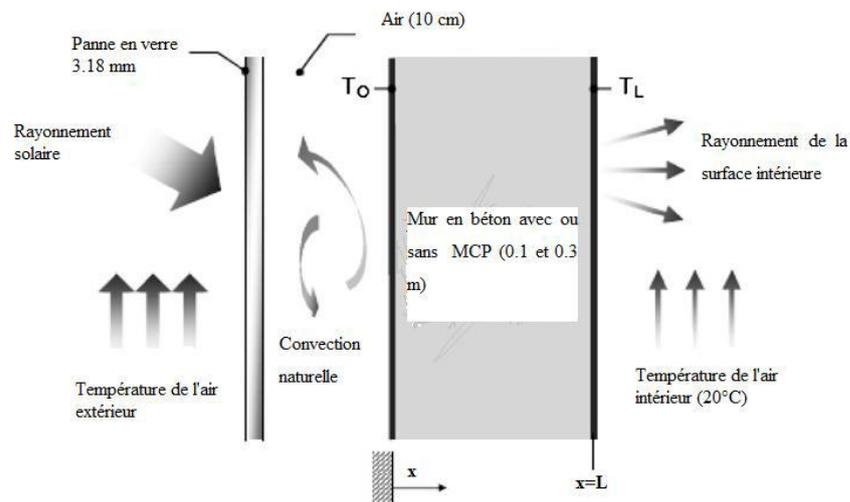


Fig.IV.6. Configuration d'un modèle de mur Trombe MCP [77].

Dans la littérature, de nombreuses études concernant les murs Trombe à base de MCP, ont déjà été menées:

Askew [77] a utilisé de la cire de paraffine. *Farouk et Gucero* (1979) ont employé un mélange de sel de Glauber et de la cire sunocoP-116. Ces différents travaux ont montré que les murs Trombe à base de MCP nécessitent moins d'espace entre le mur et la couche de verre ou plastique que les murs Trombe traditionnels, de plus ils sont plus légers que ces derniers.

Bourdeau [90] a étudié la possibilité de remplacer les matériaux conventionnels (béton, etc.) par des MCPs dans un mur Trombe. Les travaux expérimentaux et théoriques menés ont montré qu'il est possible de réduire la taille du mur tout en améliorant son comportement thermique.

Knowler [77] a utilisé de la cire de paraffine CG avec des additifs métalliques pour augmenter la conductivité globale et l'efficacité du mur Trombe à base de MCP. Ses travaux sont encore au stade expérimental.

Au milieu des années 1990, de nombreux investigateurs ont continué à étudier le mur Trombe intégrant des MCP. Un mur solaire intégrant de la cire de paraffine noire (température de fusion 25 – 30 °C) a été mis en place pour absorber l'énergie solaire. Ils ont montré que l'utilisation du MCP dans le mur Trombe pouvait faire diminuer les fluctuations de température occasionnées par l'environnement extérieur. De plus, il a été noté que le point de fusion du MCP a une influence sur la température de sortie de l'air. Il apparaît aussi pour le chauffage que l'épaisseur optimale du mur doit être approximativement égale à 50 mm et la température de fusion doit être de quelques degrés au-dessus de la température ambiante [77].

IV.4.3. Intégration des MCP dans les plafonds

Les produits à base de MCP placés dans les plafonds pour améliorer le confort du bâtiment sont en général des panneaux à base de MCP, le plus connu étant le panneau DuPont™ Energain® [76].

Le panneau DuPont™ Energain^R (Figure IV.7) inertie thermique offre des propriétés intéressantes à la fois en termes d'économie d'énergie et de contrôle de la température de l'ambiance des bâtiments à structures légères. Le MCP utilisé se présente comme un panneau recouvert d'aluminium en surface, contenant un composé solide de copolymère et de paraffine.

Les performances énergétiques ont montré que 1m^2 du panneau MCP peut stocker une quantité de chaleur équivalente à 1m^2 de béton dont l'épaisseur est 8 fois celle de panneau MCP. Les résultats ont montré également que le panneau MCP employé, peut diminuer les coûts énergétiques allant jusqu'à 35 % pour la climatisation et 15 % pour le chauffage au cours de la nuit et en période hivernale.

Au cours de la journée, le panneau plafond MCP est soumis à des sources de chaleur internes. Le rôle du panneau au cours de la journée est d'absorber la chaleur alors que pendant la nuit, la chaleur emmagasinée peut être restituée [76].



Fig.IV.7. Exemple d'intégration des MCP aux plafonds [76]

Koschenz & Lehmann [91] ont développé un panneau plafond pour l'incorporer dans les bâtiments à structures légères et modernisées. Le système permet l'utilisation de l'énergie solaire pour le chauffage et le refroidissement des bâtiments. La réalisation du panneau est effectuée par l'utilisation de la paraffine avec une capacité de stockage de l'ordre de $300\text{ Wh/J}\cdot\text{m}^2$ et une épaisseur de 5 cm. Pour améliorer le transfert de chaleur, les auteurs ont intégré des tubes capillaires et des ailettes en aluminium.

Néanmoins, pour certaines applications, il est fortement déconseillé d'intégrer directement les MCP au plafond. Dans ces cas, il est recommandé, soit d'utiliser des tubes de stockage équipés de MCP, soit des caloducs avec le faux plafond.

Depuis le 1^{er} Avril 2008, la communauté urbaine du Grand Lyon situé à Vénissieux (France) a opté pour les produits de DuPontTM Energain^R pour contribuer à sa politique d'innovation visant à réduire sa consommation énergétique et à améliorer le confort thermique sans utiliser la climatisation. Les MCP sont placés à l'intérieur du plénum du faux-plafond, dans les bureaux et les salles de réunion. Le choix de l'intégration des MCP a été retenu afin d'éviter la maçonnerie et par conséquent ne pas diminuer les surfaces intérieures du bâtiment [77] .

IV.4.4. Les MCP intégrés à la toiture

Les sollicitations solaires sont plus importantes au niveau des toitures d'un bâtiment, car il s'agit de la surface la plus exposée au rayonnement solaire. La toiture joue un rôle de tampon thermique entre l'environnement intérieur et l'extérieur (Figure IV.8).



Fig.IV.8. Toiture avec MCP [92].

Pour réduire cet apport énergétique provenant de la toiture, trois solutions peuvent être envisagées :

- Arrêter le rayonnement solaire avant qu'il n'atteigne la paroi.
- Limiter l'absorption de l'énergie par la paroi.
- Limiter le transfert de l'énergie absorbée par la paroi.

Pasupathy et al [92] ont étudié l'influence de l'effet tampon thermique d'un matériau à changement de phase intégré à la toiture. Cette étude associe expérimentation et simulation numérique. Le MCP utilisé est l'hydrate de sel inorganique avec une température de changement de phase comprise entre 26 à 28°C et une épaisseur de 2,5 cm.

Les résultats ont montré que, pour une seule couche de MCP intégrée au toit, l'effet tampon thermique n'est valide que sur une période allant de Décembre à Avril. Du mois de Mai à Novembre, les résultats ne sont pas satisfaisants.

Pasupathy et Velraj [87] ont observé en été, dans les conditions météorologiques de Chesnay, que le MCP adéquat pour maintenir la température constante du bas de la dalle de béton, devait avoir, entre 3h et 6h du matin, une température de fusion supérieure de 6°C à 7°C, à la température ambiante. Pour la couche supérieure du MCP, un produit commercial Climsel a été choisi. Il s'agit du Climsel C-32 dont la température de changement de phase est de 32°C. Avec une épaisseur de 4cm pour la couche supérieure, les simulations numériques montrent que la couche inférieure du MCP a une température constante voisine de sa température de changement de phase, ce qui favorise la méthode du MCP intégré à la toiture.

Castell et al [93] ont également étudié l'influence des MCP intégrés à la toiture dans le cadre du projet MOPCOM. Ils ont montré qu'il y avait atténuation de la température au sein de leurs cabines.

Heim [94] a démontré numériquement par deux méthodes (méthodes de capacité calorifique apparente et de terme source pour chaleur latente), que pour les parois plâtre-MCP dans lesquelles les faces internes subissent des fluctuations rapides de température (cas des parois ensoleillées, telles que les toitures), une couche mince d'un panneau plâtre-MCP de chaleur latente élevée est préférable à celle possédant une chaleur latente relativement faible.

IV.4.5. Intégration des MCP dans les fenêtres

Les travaux sur les fenêtres à base de MCP les plus connus, sont ceux du cabinet architectural «GlassX» de Dietrich Schwarz, qui a mis au point les fenêtres «GlassX» (Figure IV.9).

Ces fenêtres sont composées de trois éléments :

- Une isolation translucide.
- Une protection contre les surchauffes estivales.
- Un matériau à changement de phase intégré dans des contenaires hermétiquement scellés en polycarbonate peints en gris pour favoriser l'efficacité de l'absorption.

En général, c'est un MCP à base de sel hydraté avec une température de fusion de l'ordre de 27 °C, qui est utilisé. Cette paroi est scellée par un verre de sécurité trempé d'une épaisseur de 6 mm, qui peut être agrémenté d'une sérigraphie esthétique du côté intérieur.

En été, il y a un réfléchissement total des rayons solaires sur la fenêtre, alors qu'en hiver, les rayons solaires traversent complètement la fenêtre. D'après des études récentes, la capacité de stockage de l'énergie des fenêtres «Glass X» est dix fois plus grande que celle du béton ordinaire [77].



Fig.IV.9. Fenêtre Glass X[77] .

Ismail et Henriquez [95] ont étudié l'intégration des MCP dans le système de vitrage des fenêtres pour réduire l'énergie transmise vers l'extérieur. Les auteurs ont montré que l'utilisation des fenêtres double vitrages rempli de MCP engendre de fortes réductions des rayonnements infrarouge et ultraviolet, comparativement aux systèmes, simple et double vitrages remplis d'air.

IV.4.6. Intégration des MCP dans les rideaux

Les rideaux à base de MCP (Figure IV.10) sont encore au stade de l'expérimentation dans l'optique d'une amélioration du confort résidentiel. Le principe de fonctionnement consiste à laisser les fenêtres ouvertes afin que les rideaux soient exposés aux rayonnements solaires. La fusion des MCP permet de rafraîchir l'intérieur du bâtiment. Au cours du refroidissement nocturne ou par temps nuageux, le rideau libère la chaleur solaire emmagasinée, permettant ainsi aux MCP de se solidifier et à la pièce concernée de se réchauffer.



Fig.IV.10. Rideaux à MCP [77].

Les travaux les plus avancés sont ceux de Buddhi et al, et d'Harald Mehling et al.

- *Buddhi et al* [96] ont étudié la performance thermique d'une cellule d'essai (1m x 1m x 1m) avec et sans matériau à changement de phase. Le MCP utilisé était l'acide l'aurique (température de fusion de 49°C). Au cours des essais, les auteurs ont constaté que la température de l'air dans la cellule augmente jusqu'à 4°C durant 4-5 heures pendant la période nocturne.
- *Harald Mehling et al* [97] ont mis au point un rideau à base de MCP qui permet de décaler le pic de température diurne de 3 heures et d'abaisser la température du bâtiment de 2°C sur cette période diurne. En raison des propriétés optiques des MCP, ces rideaux sont translucides, ce qui signifie qu'ils brillent en présence des rayons solaires. De ce fait, le rideau devient un élément multifonctionnel et ce en améliorant le confort du bâtiment tout en participant à la décoration intérieure de la maison.

IV.4.7. Protection solaire avec MCP

Une autre façon de renforcer l'effet tampon thermique d'un bâtiment est d'utiliser les protections solaires de MCP. Les stores solaires sont le plus souvent installés du côté extérieur des fenêtres.

Le système de protection solaire mis en place est adapté pour un climat chaud en été. Il est surtout relativement adéquat par des zones à fluctuations fortes de températures diurnes et nocturnes [76].

Les principaux résultats sur les protections solaires développées et testées à l'échelle de laboratoire sont:

- Le décalage du gain de chaleur du midi au soir.
- L'amélioration du confort thermique.
- L'emploi des MCP dans les stores empêchent ces derniers d'agir comme une source de chaleur.

Les expérimentations ont donc permis de conclure que pour des climats chauds ayant des fluctuations de températures diurnes et nocturnes importantes, l'utilisation des MCP dans les protections solaires est efficace pour atténuer la température à l'intérieur d'une pièce.

Mehling [97] a proposé un système de protection solaire utilisant le sel hydraté $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ comme MCP, pour accroître la capacité de stockage de chaleur des stores et permettre ainsi de retarder la montée de température l'après-midi d'une part et de faciliter la ventilation de la chaleur emmagasinée vers l'extérieur, d'autre part.

IV.4.8. Refroidissement des cellules photovoltaïques par MCP

L'efficacité des cellules photovoltaïques diminue lorsque la température augmente. Cela peut généralement donner lieu à une perte du rendement de 0,5% par degré d'accroissement de la température de fonctionnement de la cellule.

Les cellules subiront également une dégradation à long terme si la température dépasse une certaine limite [98]. Ce problème peut être évité en maintenant une température uniforme de l'ordre de 25°C dans tout le panneau.

La température du PV peut dépasser 40°C et induire par conséquent une baisse de puissance dans le PV à base de silicium cristallin. L'accroissement de la température de fonctionnement se traduit également par une dégradation accélérée des PV due à la délamination cellulaire permettant l'infiltration d'humidité.

Les systèmes de refroidissement par air ou par eau sont limités par un transfert de chaleur très faible et des coûts élevés en ce qui concerne l'investissement et la maintenance [98].

Toutefois, un nouveau procédé pour réguler la montée en température du PV, basé sur l'utilisation des matériaux à changement de phase (MCP), qui absorbent de l'énergie sous forme de chaleur latente à une température de transition de phase constante, a été développé et utilisé récemment. Les MCP en phase de transition de phase solide-liquide à 25 °C peuvent maintenir la température de fonctionnement du PV à environ 25 °C.

Huang et al [98] ont expérimenté différentes configurations d'ailettes métalliques insérées dans le système (PV/MCP) afin d'améliorer le transfert de chaleur. Un modèle 3D à petite échelle a été développé et validé avec le modèle 2D (validé expérimentalement) pour la régulation de la température du PV à l'aide de MCP.

IV.5. Conclusion

Les travaux théoriques, numériques et expérimentaux rapportés dans ce chapitre permettent de constater qu'il est nécessaire de choisir une unité de stockage de l'énergie thermique pour augmenter le confort thermique d'une part, et diminuer la facture énergétique d'autre part. Il apparaît que stockage par chaleur latente requiert moins de volume que celui par chaleur sensible.

Chapitre V

Modélisation et simulation d'une toiture PVT avec intégration de MCP

V.1. Introduction

L'intégration des matériaux à changement de phase (MCP) dans les bâtiments incitent de plus en plus l'intérêt des chercheurs. Une attention particulière est portée au comportement de ces matériaux. Ce dernier est régi par des équations non linéaires qui traduisent le changement de phase. Les applications dans le secteur du bâtiment étant généralement à des températures inférieures à 50°C, le changement de phase prépondérant est par conséquent la fusion/solidification. Aussi ce type de changement de phase doit être pris en compte dans notre modèle.

Dans la littérature, de nombreuses solutions analytiques sont proposées pour résoudre les cas les plus simples concernant les problèmes de changement de phase (propriétés thermo physiques constantes dans chacune des phases, géométries simples, etc.). Cependant ces solutions ne suffisent plus lorsqu'on s'intéresse à des problèmes plus complexes. Le traitement des problèmes de changement de phase en milieu fini requiert par conséquent le recours au calcul numérique.

Dans ce chapitre les méthodes numériques les plus courantes permettant de calculer les températures à l'intérieur de la toiture (PVT-MCP) ainsi que les flux transférés seront exposées. Ce sont essentiellement les méthodes de résolution de l'équation de conduction de la chaleur dans un matériau qui change de phase. Nous présenterons également la modélisation et la simulation numérique associée, ainsi que le programme de simulation que nous avons élaboré à l'aide de logiciel de MATLAB. Dans notre modèle, les caractéristiques des panneaux sont ceux de la société Du PontTM Energain^R.

V.2. Méthodes numériques

V.2.1. La méthode enthalpique

Cette méthode est largement utilisée pour décrire le changement de phase des MCP. Elle consiste à considérer le domaine d'étude comme une seule phase dont les propriétés thermo physiques dépendent de la température et à exprimer l'équation de la conservation de l'énergie sous forme enthalpique. La robustesse de la méthode enthalpique résulte du fait qu'elle permet de déterminer le champ de température sans avoir recours à la connaissance de la progression du front de solidification dans le temps.

Le principe de cette méthode consiste à utiliser, pour les deux phases, une variable unique, l'enthalpie H , comme inconnue, réduisant ainsi le système d'équation à une seule équation de transfert thermique [76] :

$$\frac{\partial H}{\partial t} + \nabla \cdot (f_l H_l \vec{u} + f_s H_s \vec{u}) = \vec{\nabla} \cdot (\bar{\lambda} \cdot \vec{\nabla} T) \quad (\text{V.1})$$

En négligeant les effets de convection, l'équation (V.1) devient :

$$\frac{\partial H}{\partial t} = \vec{\nabla} \cdot (\bar{\lambda} \cdot \vec{\nabla} T) \quad (\text{V.2})$$

L'enthalpie H est définie comme suit [76] :

$$H(T) = \int_{T_{ref}}^T c_p(T) \rho(T) dT \quad (\text{V.3})$$

Où, T_{ref} est une valeur de référence arbitraire. Pour des problèmes de solidification et de fusion, H est définie par :

$$H(T) = \begin{cases} \int_{T_{ref}}^T \rho_s(T) c_{ps}(T) dT & T \leq T_f \\ \int_{T_{ref}}^T \rho_s(T) c_{ps}(T) dT + \rho_l(T) c_{pl}(T) dT + \rho_l L & T \geq T_f \end{cases} \quad (\text{V.4})$$

Généralement, la température de référence est égale à la température de changement de phase, soit : $T_{ref} = T_F$.

La conductivité thermique $\bar{\lambda}$ est définie par :

$$\bar{\lambda} = \lambda_l f_l + f_s \lambda_s \quad (\text{V.5})$$

L'équation de l'énergie se présente sous forme enthalpique, dans un repère cartésien (x, y) comme suit:

$$\frac{\partial h}{\partial t} + u \frac{\partial h}{\partial x} + v \frac{\partial h}{\partial y} = \frac{\dot{E}_G}{\rho} + \alpha \nabla^2 h \quad (\text{V.6})$$

\dot{E}_G , étant le terme source de chaleur latente

L'enthalpie totale peut être définie comme la somme de l'enthalpie sensible h , et de la chaleur latente ΔH :

$$H = h + \Delta H \quad (\text{V.7})$$

Il est à noter que pour la fusion isotherme, la valeur de la chaleur latente absorbée est:

$$\Delta H = f(T) = \begin{cases} L & , T > T_m \\ 0 & , T < T_m \end{cases} \quad (\text{V.8})$$

A l'équilibre d'énergie, sur un volume de contrôle de changement de phase, on obtient l'expression suivante:

$$\rho H dV = \int_s -\rho H (u.n) dS + \int_s \lambda (\nabla T . n) dS \quad (\text{V.9})$$

Où u est un terme général de vitesse dans toutes les directions.

L'application du théorème de divergence (Green-Ostrodrasky) à l'équation (V.9) conduit à:

$$\rho \frac{\partial H}{\partial t} + \text{div}(H \rho u) - \text{div}(\lambda \nabla T) = 0 \quad (\text{V.10})$$

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial t} \Delta H + \text{div}(h.u) + \text{div}(\Delta H . u) - \alpha \nabla^2 h = 0 \quad (\text{V.11})$$

L'équation (V.11) peut être mise sous la forme suivante :

$$\begin{aligned} \frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial t} \Delta H + h \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} \right) + u \cdot \left(\frac{\partial h}{\partial x} + \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \Delta H \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} \right) \\ + u \left(\frac{\partial}{\partial x} \Delta H + \frac{\partial}{\partial y} \Delta H \right) - \alpha \nabla^2 h = 0 \end{aligned} \quad (\text{V.12})$$

Tenant compte que:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \quad (\text{V.13})$$

L'équation (V.12) prend alors la forme suivante:

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial t} \Delta H + u \left(\frac{\partial h}{\partial x} + \frac{\partial h}{\partial y} \right) + u \left(\frac{\partial}{\partial x} \Delta H + \frac{\partial}{\partial y} \Delta H \right) - \alpha \nabla^2 h = 0 \quad (\text{V.14})$$

Cependant, pour le changement de phase, $u = 0$ à l'interface solide-liquide en raison de la variation de ΔH de 0 à L , l'équation (V.14) devient :

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial t} \Delta H + u \frac{\partial h}{\partial x} + v \frac{\partial h}{\partial y} = \alpha \nabla^2 h \quad (\text{V.15})$$

En comparant les équations (V.6) et (V.15), le terme source de chaleur latente est :

$$\dot{E}_G = -\rho \frac{\partial}{\partial t} \Delta H \quad (\text{V.16})$$

Le terme de convection dans l'équation (V.15) est négligeable:

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial t} \Delta H = \alpha \nabla^2 h \quad (\text{V.17})$$

On obtient finalement l'équation :

$$\frac{1}{\alpha} \left(\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial t} \Delta H \right) = \frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} \quad (\text{V.18})$$

V.2.2. La méthode de la capacité thermique apparente

A l'instar de la méthode enthalpique, la méthode de la capacité thermique apparente C_{app} consiste également à réduire le système d'équations décrivant le phénomène de changement de phase en une seule équation [81]. Nous pouvons écrire:

$$\rho(T) \cdot C_{app}(T_i) \frac{\partial T_i}{\partial t} = \vec{\nabla}(\bar{\lambda}(T_i) \vec{\nabla} T_i) \quad (\text{V.19})$$

Avec:

$$C_{app} = \frac{dH}{dT} \quad (\text{V.20})$$

et

$$\frac{\partial H}{\partial t} = \frac{dH}{dT} \frac{\partial T}{\partial t} \quad (\text{V.21})$$

$H(T)$ a pour expression:

$$H(T) = [(1-f)\rho_s C_s + f\rho_l C_l](T(x, y, t) - T_F) + \rho_l L_F f \quad (\text{V.22})$$

Avec:

$$f(T) = \begin{cases} 0 & \text{si } T < T_F \\ 1 & \text{si } T > T_F \end{cases} \quad (\text{V.23})$$

Pour déterminer implicitement la zone de transition liquide-solide, les fractions solide et liquide volumétriques utilisées sont:

$$f_s = \text{Volume solide} / \text{Volume total}$$

$$f_l = \text{Volume liquide} / \text{Volume total}$$

Ainsi, si le matériau est en phase solide, le volume solide est égal au volume total et le volume liquide est alors égal à 0. On en déduit que $f_s = 1$ et $f_l = 0$.

Réciproquement, si le matériau est en phase liquide, le volume liquide est égal au volume total et le volume solide est donc égal à 0. Il en résulte que $f_s = 0$ et $f_l = 1$.

Entre ces deux états, la fraction liquide (ou solide) varie dans l'intervalle $[0,1]$.

Les fractions solide et liquide sont liées par la relation $f_s + f_l = 1$

Nous arrivons à :

$$\frac{dH}{dT} = \rho_s C_s + \Delta(\rho C) \cdot f + \frac{df}{dT} \cdot (\rho_l L_F + \Delta(\rho C)(T(x, y, t) - T_F)) \quad (V.24)$$

$$\text{Avec: } \Delta(\rho C) = \rho_l C_l - \rho_s C_s$$

Ainsi, la capacité thermique apparente est définie par:

$$C_{app}(T) = \rho_s C_s + \Delta(\rho \cdot C) \cdot f + \frac{df}{dT} (\rho_l L_F + \Delta(\rho \cdot C))(T(x, y, t) - T_F) \quad (V.25)$$

D'où:

$$C_{app} \frac{dT(x,y,t)}{dt} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda(x, T) \frac{dT}{dx} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda(y, T) \frac{dT}{dy} \right) \quad (V.26)$$

On supposera que les conductivités thermiques de chacune des phases ne dépendent pas de la variable spatiale, par conséquent:

$$C_{app}(T) \frac{dT(x,y,t)}{dt} = \lambda(T) \cdot \Delta T(x, y, t) \quad (V.27)$$

En l'absence de mesure on peut se donner une fonction à priori. On choisit une fonction de la température qui permet d'obtenir la variation de la capacité calorifique du matériau à changement de phase.

(Kuzink et al, 2008) ont obtenu expérimentalement l'évolution de la capacité calorifique au sein de la plaque MCP en fonction de la température (Figure V.1) [81].

$$C_p = 4250 + 10750 \cdot \exp\left(-\left(\frac{22.6-T}{4}\right)^2\right) \text{ si } T \leq 22.6^\circ\text{C} \quad (V.28)$$

$$C_p = 4250 + 10750 \cdot \exp\left(-\left(\frac{22.6-T}{3}\right)^2\right) \text{ si } T > 22.6 \quad (V.29)$$

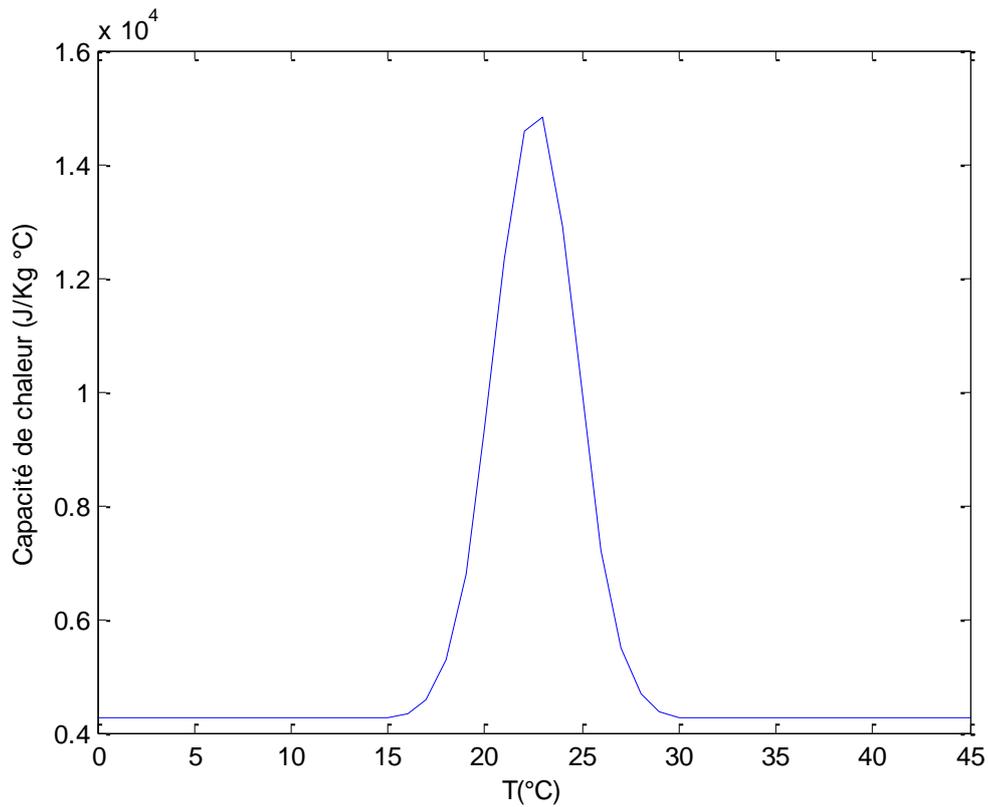


Fig. V.1. Evolutions de la capacité thermique en fonction de la température.

V.2.3. Comparaison entre les deux méthodes

Pour la résolution du problème de changement de phase, les méthodes enthalpique et de la capacité apparente sont très attractives car elles présentent les avantages suivants:

- Elles ont déjà été étudiées par plusieurs investigateurs tels que *Voller & Cross, 1981, Voller & Prakash, 1987, (Date, 1992), Caldwell & Chan, 1998, Bianchi et al, 2004,* pour la méthode enthalpique et *L.E. & Goodrich, 1978, Voller & Prakash, 1987, Yao & Chait, 1993, Stéphane, 2013, et Sara, 2016,* pour la méthode de la capacité thermique apparente [76].
- Le système d'équations du problème de changement de phase se ramène à une seule équation de transfert de chaleur.
- La détermination de l'interface solide –liquide n'est pas nécessaire pour obtenir le champ de température.

Néanmoins la méthode enthalpique semble être mieux adaptée que celle de la capacité thermique apparente dans la mesure où cette dernière présente des difficultés de modélisation dans la plage de changement de phase. Ainsi dans le cadre du présent travail, nous optons pour la méthode enthalpique.

Notons que les deux méthodes nécessitent une résolution selon un schéma Euler explicite ou implicite ou bien un schéma de Krank-Nicholson, pour mettre à jour à chaque itération les grandeurs comme la température, l'enthalpie et la fraction solide, et de ce fait par conséquent un critère de convergence du schéma est nécessaire.

V.3. Problème de Stefan en 1D

Ce problème porte sur la description en 1D d'un schéma numérique (méthode de pas de temps variable) pour la résolution de l'équation de la chaleur pour des problèmes de changement de phase de condition de type de Neumann.

La figure V.2 présente un système de solidification ou de fusion à une seule phase.

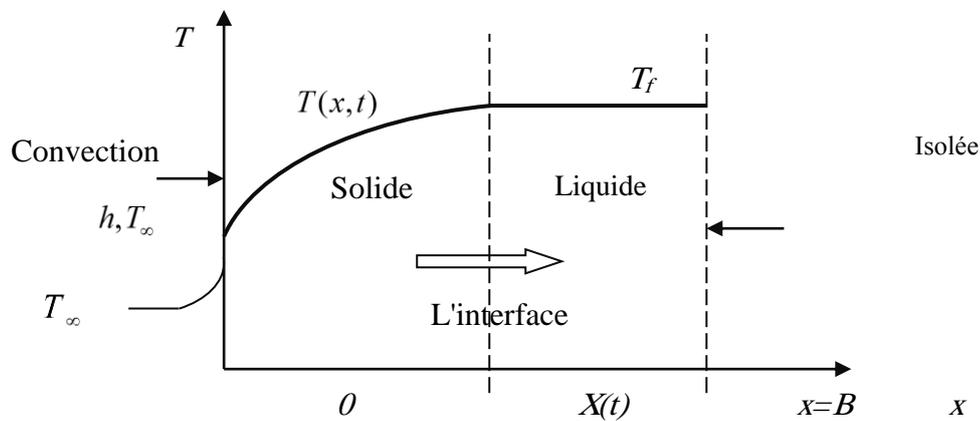


Fig. V.2. Géométrie pour un problème de la solidification d'une seule phase

La formulation mathématique d'un tel problème est :

Région solide :

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial t} \quad 0 \leq x \leq X(t), t > 0 \quad (\text{V.40})$$

Condition aux limites :

$$-k \frac{\partial T}{\partial x} = h(T_\infty - T) \quad x = 0, t > 0 \quad (\text{V.41})$$

À l'interface :

$$T(x, t) = T_f \quad x = X(t), t > 0 \quad (\text{V.42})$$

$$k \frac{\partial T}{\partial x} = \rho L \frac{dX(t)}{dt} \quad x = X(t), t > 0 \quad (\text{V.43})$$

L'approximation des différences finies sur les équations (V.40) à (V.43) est exposée dans ce qui suit:

En écrivant l'équation (V.40) sous la forme :

$$\frac{T_{i-1}^{n+1} - 2T_i^{n+1} + T_{i+1}^{n+1}}{(\Delta x)^2} = \frac{1}{\alpha} \frac{T_i^{n+1} - T_i^n}{\Delta t_n} \quad (\text{V.44})$$

Et en adoptant la notation $T(x, t_n) = T(i\Delta x, t_n) \equiv T_i^n$

L'équation (V.44) est réarrangée comme suit:

$$\left[-r_n T_{i-1}^{n+1} + (1 + 2r_n) T_i^{n+1} - r_n T_{i+1}^{n+1} \right]^{(p)} = T_i^n \quad (\text{V.45})$$

L'exposant p au-dessus de la parenthèse se rapporte à la p -ème itération, et le paramètre r_n est défini comme suit :

$$r_n = \frac{\alpha \Delta t_n}{(\Delta x)^2}, \quad n = 1, 2, 3, \dots \text{ et } \Delta t_n = t_{n+1} - t_n$$

La condition aux limites de la convection (équation V.45) est réarrangée de la manière suivante :

$$\frac{\partial T}{\partial x} = HT - HT_\infty, \quad \text{avec } H = h/k$$

Nous obtenons :

$$\frac{T_1^{n+1} - T_0^{n+1}}{\Delta x} = HT_0^{n+1} - HT_\infty.$$

Ce résultat est réarrangé sous la forme suivante:

$$\left[T_1^{n+1} - (1 + H\Delta x T_0^{n+1}) \right]^{(p)} = -H\Delta x T_\infty \quad (\text{V.46})$$

La condition de continuité de la température à l'interface, (équation V.42), a pour expression : $T_{n+1}^{n+1} = T_f^*$ = Température de fusion.

L'équation d'équilibre d'énergie de l'interface (équation V.43) est discrétisée comme suit :

$$\frac{T_{n+1}^{n+1} - T_n^{n+1}}{\Delta x} = \frac{\rho L}{k} \frac{\Delta x}{\Delta t_n} \quad (\text{V.47})$$

$$[\Delta t_n]^{(p+1)} = \frac{\rho L}{k} \left[\frac{(\Delta x)^2}{T_f^* - T_n^{n+1}} \right]^{(p)} \quad (\text{V.48})$$

Depuis $T_{n+1}^{n+1} = T_f^* =$ La température de fusion.

V.4. Problème de Stefan en 2D

Dans ce modèle, les hypothèses adoptées sont:

- Le problème est bidimensionnel et transitoire.
- Tout autre phénomène de transfert de chaleur est négligé.
- La conduction dans les phases solide et liquide du MCP est prise en compte.
- La dissipation visqueuse est négligée.
- Les propriétés physiques du MCP sont constantes mais peuvent être différentes d'une phase à l'autre pour le MCP.
- Le MCP est parfaitement pur. Il n'y a pas de bulles d'air dans celui-ci et le changement de phase est considéré isotherme.
- Le MCP est homogène.

L'équation de l'énergie se présente sous forme enthalpique, dans un repère cartésien, comme suit [76]:

$$\frac{1}{\alpha} \left(\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial t} \Delta H \right) = \frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} \quad (\text{V.49})$$

Avec:

$$h(x, y, 0) = h_i \quad x \geq 0, y \geq 0 \quad t = 0 \quad (\text{V.50})$$

$$h(0, y, t) = h_G \quad x = 0, y \geq 0 \quad t > 0 \quad (\text{V.51})$$

$$h(x, 0, t) = h_D \quad x \geq 0, y = 0 \quad t > 0 \quad (\text{V.52})$$

$$\frac{\partial}{\partial y} h(x, 0, t) = 0 \quad x \geq 0, y = 0 \quad t > 0 \quad (\text{V.53})$$

$$\frac{\partial}{\partial y} h(x, H, t) = 0 \quad x \geq 0, y = a \quad t > 0 \quad (\text{V.54})$$

La transformation des variables dépendantes et indépendantes des équations de conservation et de leurs conditions aux limites, en variables sans dimension, permet de spécifier les conditions du problème à l'aide d'un nombre restreint de paramètres et facilite significativement la validation des résultats.

Les variables sont adimensionnées de la façon suivante:

$$\xi = \frac{x}{a}, x = a.\xi \quad \eta = \frac{y}{b}, y = b.\eta \quad F_0 = \frac{\alpha t}{b^2}, t = \frac{b^2 F_0}{\alpha} \quad h^* = \frac{h}{H_f}, h = H_f.h^*$$

$$\Delta H^* = \frac{\Delta H}{H_f}, \Delta H = H_f.\Delta H^*$$

En substituant ces expressions dans l'équation d'énergie et leurs conditions initiale et aux limites, on obtient alors :

$$\frac{\partial}{\partial F_0} h^* + \frac{\partial}{\partial F_0} \Delta H^* = d^2 \frac{\partial^2}{\partial \xi^2} h^* + \frac{\partial^2}{\partial \eta^2} h^* \quad (\text{V.55})$$

Avec: $d = \frac{a}{b}$

Conditions initiale et aux limites :

$$h^*(0, \eta, F_0) = h_G^* \quad \xi = 0, \eta \geq 0 \quad F_0 > 0 \quad (\text{V.56})$$

$$h^*(\xi, 0, F_0) = h_D^* \quad \xi \geq 0, \eta = 0 \quad F_0 > 0 \quad (\text{V.57})$$

$$\frac{\partial}{\partial \eta} h^*(\xi, 0, F_0) = 0 \quad \xi \geq 0, \eta = 0 \quad F_0 > 0 \quad (\text{V.58})$$

$$\frac{\partial}{\partial \eta} h^*(\xi, 1, F_0) = 0 \quad \xi \geq 0, \eta = 1 \quad F_0 > 0 \quad (\text{V.59})$$

En discrétisant notre problème par la méthode de différence finies, l'approximation de différences centrées aux dérivées spatiales, et des approximations de différences en aval aux dérivées de temps appliquées à l'équation (V.55) donnent:

$$\frac{\partial}{\partial F_0} h^* = \frac{h_{i,j}^{*n+1} - h_{i,j}^{*n}}{\Delta F_0} \quad (\text{V.60})$$

$$\frac{\partial}{\partial F_0} \Delta H^* = \frac{\Delta H_{i,j}^{*n+1} - \Delta H_{i,j}^{*n}}{\Delta F_0} \quad (\text{V.61})$$

$$\frac{\partial^2}{\partial \xi^2} h^* = \frac{h_{i+1,j}^{*n+1} + h_{i-1,j}^{*n+1} - 2h_{i,j}^{*n+1}}{(\Delta \xi)^2} \quad (\text{V.62})$$

$$\frac{\partial^2}{\partial \eta^2} h^* = \frac{h_{i,j+1}^{*n+1} + h_{i,j-1}^{*n+1} - 2h_{i,j}^{*n+1}}{(\Delta \eta)^2} \quad (\text{V.63})$$

En remplaçant les différents termes de l'équation V.55, par leurs expressions respectives (équations (V.60), (V.61), (V.62) et (V.63)), nous obtenons :

$$\left(\frac{h_{i,j}^{*n+1} - h_{i,j}^{*n}}{\Delta F_0} + \frac{\Delta H_{i,j}^{*n+1} - \Delta H_{i,j}^{*n}}{\Delta F_0} \right) = (d)^2 \left(\frac{h_{i+1,j}^{*n+1} + h_{i-1,j}^{*n+1} - 2h_{i,j}^{*n+1}}{(\Delta \xi)^2} \right) + \left(\frac{h_{i,j+1}^{*n+1} + h_{i,j-1}^{*n+1} - 2h_{i,j}^{*n+1}}{(\Delta \eta)^2} \right) \quad (\text{V.64})$$

La forme explicite pour un nœud intérieur i, j est alors:

$$h_{i,j}^n = \Delta H_{i,j}^{n+1} - \Delta H_{i,j}^n + \left(1 + \frac{2(d)^2 \Delta F_0}{(\Delta \xi)^2} + \frac{2\Delta F_0}{(\Delta \eta)^2} \right) h_{i,j}^{n+1} - \frac{2(d)^2 \Delta F_0}{(\Delta \xi)^2} (h_{i,j}^{n+1} - h_{i-1,j}^{n+1}) - \frac{\Delta F_0}{(\Delta \eta)^2} (h_{i,j+1}^{n+1} - h_{i,j-1}^{n+1}) \quad (\text{V.65})$$

Les équations pour les nœuds de frontière sont obtenues de manière similaire.

- Nœuds de frontière à $x=0$ avec condition aux limites de première espèce (température imposée):

$$h_{i,j}^n = h_G \quad (\text{V.66})$$

- Nœuds de frontière à $x=b$ avec condition aux limites de première espèce (Température imposée):

$$h_{i,j}^n = h_D \quad (\text{V.67})$$

- Nœuds de frontière à $y=0$ avec condition aux limites de deuxième espèce (isolée):

$$\begin{aligned}
h_{i,1}^n &= \Delta H_{i,1}^{n+1} - \Delta H_{i,1}^n + \left(1 + \frac{2(d)^2 \Delta F_0}{(\Delta \xi)^2} + \frac{2\Delta F_0}{(\Delta \eta)^2} \right) h_{i,1}^{n+1} \\
&- \frac{2(d)^2 \Delta F_0}{(\Delta \xi)^2} (h_{i-1,2}^{n+1}) - \frac{\Delta F_0}{(\Delta \eta)^2} (h_{i+1,1}^{n+1} - h_{i-1,2}^{n+1})
\end{aligned} \tag{V.68}$$

- Nœuds de frontière à $y=H$ avec condition aux limites de deuxième espèce (isolée):

$$\begin{aligned}
h_{i,N}^n &= \Delta H_{i,N}^{n+1} - \Delta H_{i,N}^n + \left(1 + \frac{2(d)^2 \Delta F_0}{(\Delta \xi)^2} + \frac{2\Delta F_0}{(\Delta \eta)^2} \right) h_{i,N}^{n+1} \\
&- \frac{2(d)^2 \Delta F_0}{(\Delta \xi)^2} (h_{i,N-1}^{n+1}) - \frac{\Delta F_0}{(\Delta \eta)^2} (h_{i+1,N}^{n+1} - h_{i-1,N}^{n+1})
\end{aligned} \tag{V.69}$$

Cependant, on a empiriquement montré qu'un certain temps doit s'écouler avant que les courants de convection ne soient établis pour dominer le transfert de chaleur par conduction. Bénard, Gobin et Martinez [99] ont déterminé expérimentalement que le temps de transition :

$$t_0 = 4.59 \left(\frac{\text{Pr}}{\text{Ste}} \cdot \frac{\rho_s}{\rho_L} \cdot \text{Ra}^{-\frac{1}{2}} \right) \tag{V.70}$$

V.5. Modélisation et simulation d'une toiture photovoltaïque avec MCP (PVT-MCP)

V.5.1. Description du modèle numérique

L'analyse thermique de la toiture photovoltaïque avec intégration des MCP comme complément d'isolation (PVT-MCP) doit prendre en compte plusieurs facteurs tels que la nature et les caractéristiques thermo physiques des MCP, la répartition et la distribution de ces matériaux dans la toiture (PVT-MCP), la variation de la température de chaque côté de toit (conditions aux limites) et les échanges thermiques.

Afin de simplifier la procédure de calcul, plusieurs hypothèses doivent être faites lors de la mise en équation de ce problème. Ainsi, l'étude d'un modèle conductif simplifié de changement de phase permet d'alléger le nombre des équations à résoudre numériquement et de réduire ainsi le temps de calcul.

L'étude du transfert thermique à travers une structure avec des MCP est confrontée à des problèmes de modélisation relativement complexes.

Ces problèmes sont dus essentiellement d'une part au changement de phase qui se produit sur une plage de température et d'autre part à la non linéarité des équations obtenues. La toiture étudiée est schématisée sur la figure V.3.

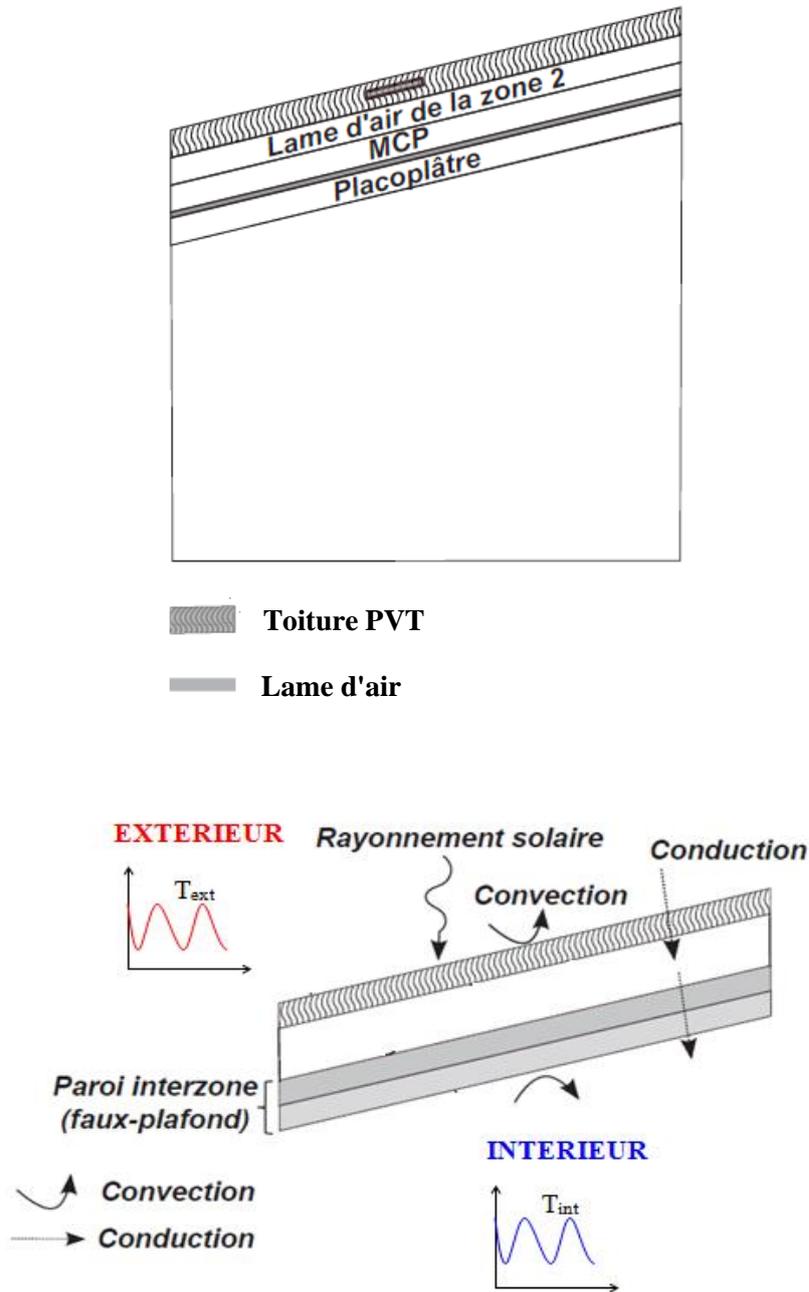


Fig. V.3. Modes de transfert de chaleur dans la toiture PVT-MCP.

En régime transitoire, l'équation de la conduction de la chaleur dans l'ensemble de la toiture (PVT-MCP) s'écrit:

$$\frac{\partial(\rho_i c_i T_i)}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(K_i \frac{\partial T_i}{\partial x} \right) \quad (\text{V.71})$$

i : Numéro des couches

ρ_i : Densité de la j^{ème} couche.

C_i : Chaleur spécifique de la j^{ème} couche.

K_i : Conductivité thermique de la j^{ème} couche.

Pour simplifier le modèle mathématique, nous considérons, les propriétés thermo physiques des matériaux de construction constantes, mais avec des valeurs différentes pour le solide et la phase liquide. Ainsi, la densité et la conductivité des MCP sont des fonctions de la fraction volumétrique liquide ou solide. La résistance d'interface est négligeable.

On suppose que le transfert thermique dans l'ensemble de la toiture se fait par conduction pure, la méthode enthalpique décrite dans le paragraphe 2.1 a été utilisée.

Dans le cadre de cette étude, le schéma de discrétisation spatiale Power Law a été utilisé. Ce choix a été motivé par le fait que, plusieurs chercheurs ont montré que ce schéma est le plus approprié pour la simulation du changement de phase par la méthode enthalpique. Par ailleurs, le schéma implicite est utilisé pour la discrétisation temporelle.

V.5.2. Modélisation du panneau solaire hybride (PVT)

Pour modéliser les échanges thermiques au sein du capteur, il est nécessaire d'avoir des informations sur le profil de température du fluide caloporteur au sien de l'échangeur.

Pour cela, des simulations numériques ont été réalisées par Lucien Blanc pour un débit d'entrée de l'échangeur de 500 L/h et un flux solaire incident de 1000 W/m^2 (figure V.4) [100].

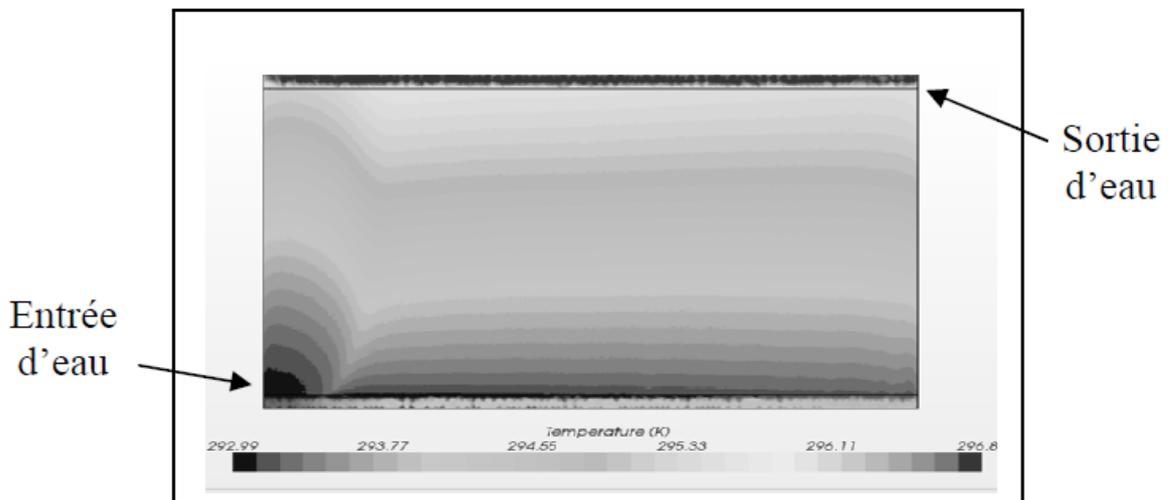


Fig. V.4. Température du fluide dans l'échangeur [100].

On remarque que le profil est quasiment monodimensionnel avec des iso températures suivant l'axe x . Cette simulation numérique sert de base à la modélisation physique du capteur PVT utilisé car elle justifie l'hypothèse d'un profil de température monodimensionnel et nous permet d'aboutir à un modèle pour lequel les bilans se font sur une tranche de fluide dx . La figure V.5 illustre la répartition des flux qui traversent le capteur, utilisé pour la modélisation.

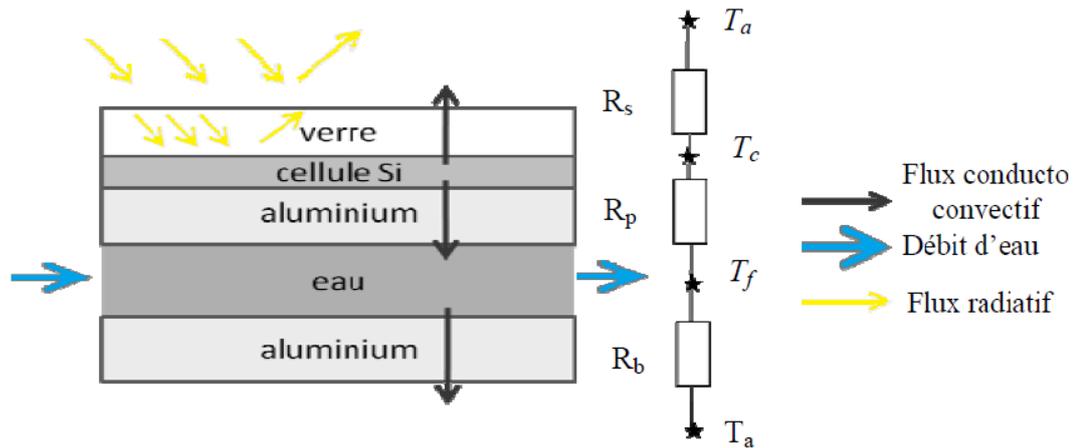


Fig. V.5. Flux et résistances thermiques à travers les différentes couches du capteur [100].

Les deux bilans énergétiques à la base de la modélisation sont [100]:

- Bilan énergétique sur les cellules photovoltaïque:

$$S = S \cdot \eta_{el} + h_{rad}(T_c(y) - T_a) + \frac{(T_c(y) - T_a)}{R_s} + \frac{(T_c(y) - T_f(y))}{R_b} \quad (V.72)$$

- Bilan sur le fluide caloporteur:

$$\frac{T_c(y) - T_f(y)}{R_p} = \frac{(T_f(y) - T_a)}{R_b} + q \cdot C_p \frac{dT_f}{dy} \quad (V.73)$$

Avec:

R_s : Résistance thermique des cellules PV à la face avant.

R_p : Résistance thermique des cellules au fluide.

R_b : Résistance thermique du fluide à la face arrière.

Les différents flux échangés sont :

- Flux échangé par rayonnement entre la couverture et le milieu extérieur:

$$\varphi_{r,v-a} = \varepsilon_v \sigma (T_v^4 - T_a^4) = h_{r,v-a} (T_v - T_a) \quad (V.74)$$

$$h_{r,v-a} = \varepsilon_v \sigma (T_v^2 + T_a^2) (T_v + T_a) \quad (V.75)$$

- Flux échangé par convection entre la couverture et l'air extérieur, il dépend principalement de la vitesse du vent et peut se calculer par [101]:

$$\varphi_{con,v-a} = h_{con}(T_v - T_a) \quad (V.76)$$

$$h_{con} = 5.7 + 3.8.V_v \quad (V.77)$$

- Le flux solaire absorbé par la couverture transparente:

$$\varphi_{a,v} = \alpha_v \cdot G \quad (V.78)$$

- L'énergie totale absorbée par le module photovoltaïque:

$$E_c = \tau_v \cdot \alpha_c \cdot G \quad (V.79)$$

- Flux échangé par rayonnement entre la vitre et le module photovoltaïque:

$$\varphi_{r,v-c} = \frac{\sigma(T_v^4 - T_c^4)}{\left(\frac{1}{\varepsilon_v} + \frac{1}{\varepsilon_c} - 1\right)} \quad (V.80)$$

$$\varphi_{r,v-c} = h_{r,v-c} \cdot (T_v - T_c) \quad (V.81)$$

$$h_{r,v-c} = \sigma \frac{(T_v^2 - T_c^2)(T_v - T_c)}{\left(\frac{1}{\varepsilon_v} + \frac{1}{\varepsilon_c} - 1\right)} \quad (V.82)$$

Les propriétés thermodynamique des paramètres de simulation de toiture (PVT-MCP) sont consignées dans les tableaux V.1, V.2 et V.3.

Tableau.V.1. Caractéristiques du panneau PVT [76].

Dimensions du module	1956.992.50	mm
Poids du module	23.5	kg
Angle d'inclinaison	32	degré
Epaisseur du canal d'eau	0.01	M
Emissivité de verre	0.88	-
Epaisseur de verre	0.003	M
Conductivité thermique de verre	1	W/mK
Coefficient d'absorption du verre	0.066	-
Transmission du verre	0.934	-
Epaisseur du PV	0.0003	M
Conductivité thermique du PV	0.036	W/mK
Coefficient de transmission de PV	0.87	-
Emissivité du PV	0.95	-

Conductivité thermique d'Aluminium	22	W/m.K
Masse volumique d'Aluminium	2.7	g/cm ³
Capacité thermique massique d'Aluminium	9.10 ²	J/Kg.cm ³
Coefficient d'absorption du PV	0.85	-
Débit d'eau	76	m ³ /h

Tableau.V.2. Caractéristiques du panneau MCP [76].

Densité: ρ_{sol}/ρ_{liq}	850/750	Kg.m ⁻³
Conductivité thermique: $\lambda_{sol}/\lambda_{liq}$	0.22/0.18	W.m ⁻¹ .°C ⁻¹
Capacité thermique: C_{sol}/C_{liq}	3134/2832.5	J.kg ⁻¹ .°C ⁻¹
Température de changement de phase: T_F	21.7	°C
Epaisseur	5.26	mm
Hauteur	1000	mm
Largeur	1198	mm
Chaleur latente	>70	KJ/Kg

Le panneau est composé d'un mélange de polymère à base d'éthylène (40%) développé par DuPont et de paraffine (60%) laminé de chaque côté par deux feuilles d'aluminium de 130 μm . Les bords sont recouverts de ruban adhésif en aluminium de 75 μm .

Tableau.V.3. Caractéristiques du placoplâtre [76].

Densité : ρ	940	kg.m ⁻³
Conductivité thermique: λ	0.16	W.m ⁻¹ .C ⁻¹
Capacité thermique: C	840	J.kg ⁻¹ .°C
Epaisseur	12.5	mm

Il a été observé que le contact n'est pas totalement parfait que lors de la pose du placoplâtre contre le panneau MCP du à l'inclinaison de la toiture, et à la dilatation du panneau MCP. Par conséquent nous considérons dans la modélisation, une couche d'air d'épaisseur maximale de 2 mm. Les propriétés thermo physiques de l'air, considérées à la valeur moyenne de 35°C, (tableau V.4) seront supposées constantes.

Le mode de transfert qui sera considéré est la conduction entre le panneau MCP et le placoplâtre.

Tableau.V.4. Propriétés physiques de l'air [76].

Densité : ρ	1.2	kg.m^{-3}
Conductivité thermique: λ	0.0267	$\text{W.m}^{-1}.\text{C}^{-1}$
Capacité thermique: C	1006	$\text{J.kg}^{-1}.\text{C}$
Épaisseur	2	mm

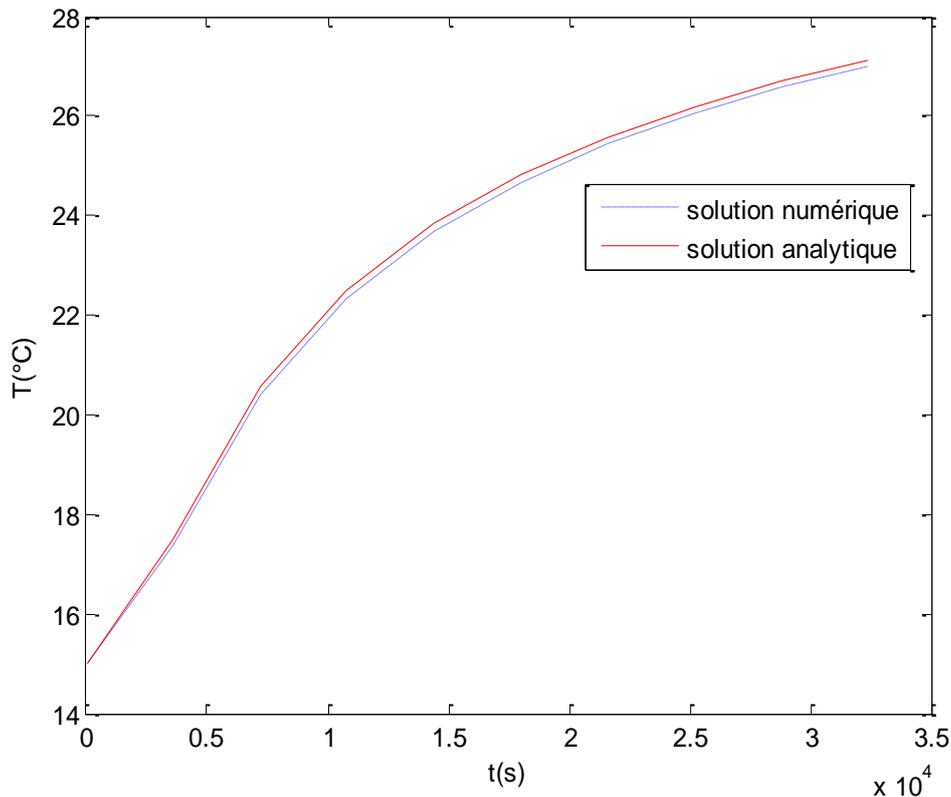
V.5.2. Validation du modèle numérique

La solution numérique obtenue a été comparée à une solution analytique connue correspondant à une paroi d'épaisseur (e) et de grandes dimensions transversales, soumise à une température imposée en surface (condition de Dirichlet).

La solution analytique $T(x,t)$ donnée par S. Drissi [81]:

$$T(x, t) = T_0 + \frac{4}{\pi} (T_i - T_0) \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(-1)^n}{(2n+1)} \exp\left(- (2n+1)^2 \pi^2 \frac{at}{e^2}\right) \cos\left(\frac{(2n+1)\pi x}{e}\right) \quad (\text{V.71})$$

L'examen de la figure V.6 permet de noter que la différence entre les solutions analytique et numérique est quasi nulle, l'écart ne dépasse pas 1%. Le pas de temps de 1s et la taille d'éléments de $e/40$ sont donc retenus pour le reste des simulations. Ces paramètres permettent d'obtenir un bon compromis entre la précision des résultats et le temps de calcul.

**Fig. V.6.** Evolution temporelle de la température

V.5.3. Conditions aux limites de la toiture

Pour notre étude, le climat de Ghardaia (Algérie) a été choisi (ses caractéristiques, ont été présentées dans le chapitre II).

V.5.3.1. La température extérieure

La température imposée est généralement mesurée. Une approximation sinusoïdale des données expérimentales peut être considérée comme suffisante pour simuler la température extérieure.

Le climat à Ghardaïa est considéré désertique. Au cours de l'année, il n'y a eu pratiquement aucune précipitation à Ghardaïa. Sur l'année 2018 (à l'instar de quasiment beaucoup d'autres années), la température moyenne à Ghardaïa est de 21.0 °C (Figure V.7) [102].

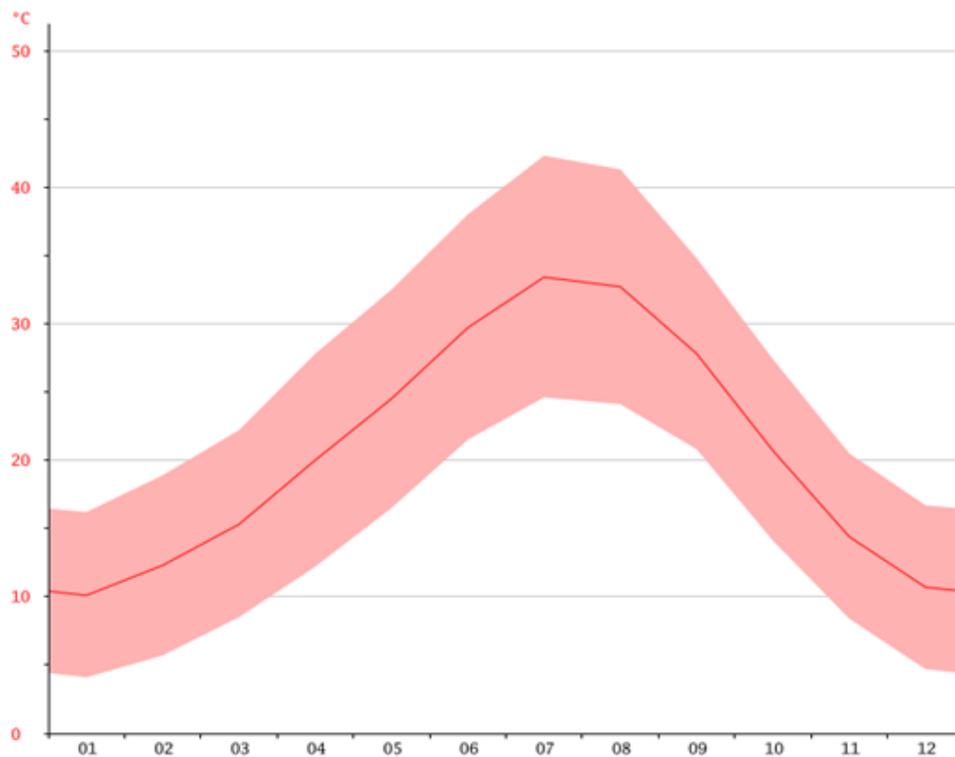


Fig. V.7. Evolution mensuelle de la température Ghardaia (Algérie)

Il est aisé de remarquer que juillet avec une température moyenne de 33.4 °C est le mois le plus chaud de l'année alors que janvier, avec une température moyenne de 10.1 °C, est le mois le plus froid.

L'équation approximant la température extérieure a pour expression :

$$T_{ext}(t) = \frac{(T_{max}+T_{min})}{2} + \left(\frac{T_{max}-T_{min}}{2}\right) \sin\left(\frac{\pi(t-8)}{12}\right) \quad (V.72)$$

T_{max} : Température maximale journalière

T_{min} : Température minimale journalière

T_{int} : Température intérieure du local (égale 23°C).

V.5.3.2. Modélisation des échanges convectifs d'une toiture (PVT-MCP)

Le matériau à changement de phase se trouvant sous la forme de panneau facilite la modélisation convective. Le problème de convection se ramène en général à la détermination d'un coefficient d'échange convectif donné par les corrélations dans le but d'obtenir la densité de flux échangée à l'interface entre le fluide et la paroi. Le calcul du coefficient d'échange, que ce soit pour la convection naturelle ou forcée, est possible par l'intermédiaire du nombre de Nusselt (Nu), qui est égal au rapport entre les quantités de chaleur échangées par convection et par conduction.

V.5.3.2.1. Transfert convectif à l'intérieur du bâtiment

En absence de toute action mécanique extérieure, le flux de chaleur par convection échangé entre la paroi intérieur et l'environnement intérieur du bâtiment s'écrit:

$$\Phi_{CVi,P} = h_{ci}PS_P(T_{si,P} - T_{ai}) \quad (V.73)$$

$\Phi_{CV,P}$: Flux convectif sur coté interne de la paroi.

h_{ci} : Coefficient d'échange convectif intérieur.

$T_{si,P}$: Température de la surface intérieure de la paroi.

T_{ai} : Température de l'air intérieur.

V.5.3.2.2. Transfert convectif à l'extérieur du bâtiment

Le transfert convectif à l'extérieur est de type forcé du fait que la paroi du bâtiment est soumise à l'influence du vent. Le flux de chaleur par convection échangé entre la paroi extérieure et l'environnement s'écrit :

$$\Phi_{CVe,P} = h_{ce}S_P(T_{se,P} - T_{ae}) \quad (V.74)$$

$\Phi_{CVe,P}$: Flux convectif sur le côté externe de la paroi.

h_{ce} : Coefficient d'échange convectif extérieur.

$T_{se,P}$: Température de la surface extérieure de la paroi.

T_{ae} : Température de l'air extérieur.

Les corrélations existantes pour déterminer le coefficient d'échange tiennent compte de la vitesse du vent et sont données sous la forme $h_{ce} = f(v)$. En explicitant, la forme générale de ces corrélations, celles-ci s'écrivent :

$$h_{ce} = a + b(v + c)^d \quad (V.75)$$

a, b, c, d : Coefficients constants.

v : Vitesse du vent.

Dans les simulations entreprises dans ce qui suit, nous n'avons choisi aucune corrélation pour le coefficient d'échange convectif extérieur afin d'évaluer l'ensemble des paramètres influents. Ce coefficient a été fixé à $20W.m^{-2}.K^{-1}$.

V.5.3.2.3. Modèle convectif de la littérature

Churchill et Chu [103] ont développé une corrélation en régime laminaire qu'en régime turbulent, pour une large gamme de valeurs du nombre de Prandtl. Dans le cas de l'air, cette corrélation se présente sous la forme suivante:

$$h_{cv} = \left[\left(\frac{0,0175 \cdot |\overline{\Delta T}|}{H} \right)^{1/2} + (1,6952 \cdot |\overline{\Delta T}|^{1/3})^{1/2} \right]^2 \quad (V.76)$$

De la même manière, Alamdari et Hammond [104] ont utilisé des corrélations déjà existantes pour l'air en régimes laminaire et turbulent. Ils en ont déduit la formule suivante:

$$h_{cv} = \left[\left(1,51 \left(\frac{|\overline{\Delta T}|}{H} \right)^{1/4} \right)^6 + (1,33 \cdot |\overline{\Delta T}|^{1/3})^6 \right]^{1/6} \quad (V.77)$$

Awbi et Hatton [105] ont effectué des mesures dans une cellule de 3m x 3m x 2.5m, adjacente sur une face à une cellule régulée en température simulant le climat extérieur.

Un réseau de résistances chauffantes a permis de tester plusieurs configurations de chauffage. Les auteurs ont développé à partir de leurs mesures la corrélation (V.77), avec D le diamètre hydraulique de la paroi:

$$h_{cv} = 1,823 \cdot \frac{|\Delta T|^{0,293}}{D^{0,121}} \quad (\text{V.78})$$

Liu & Awbi [101] ont intégré un matériau à changement de phase dans des parois d'une cellule de 3m x 3m x 2.5m (qui a été étudiée par Awbi et Hatton. Les auteurs ont observé tout au long de la paroi MCP, une valeur du coefficient convectif 2 à 3 fois supérieure à celle donnée par l'équation V.79.

$$h_{cv} = 4,1929 \frac{\Delta T^{0.293}}{D^{0.121}} \quad (\text{V.79})$$

V.5.4. Résultats et interprétations

V.5.4.1. Température du panneau MCP

L'évolution de la température du panneau MCP de la société DuPont™ Energain^R est présentée sur les figures V.8, V.9 et V.10, pour différents temps (t=5min, t=10min, t=15 min, 20min).

Nous pouvons remarquer que le profil est quasiment monodimensionnel avec des iso températures suivant l'axe y.

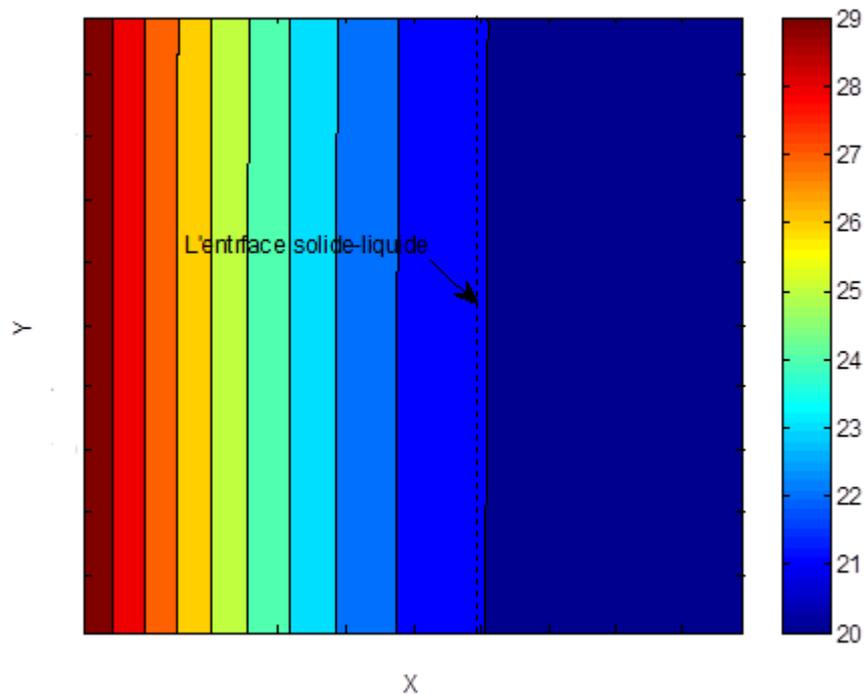


Fig. V.8. Evolution de la température du MCP à t=5min.

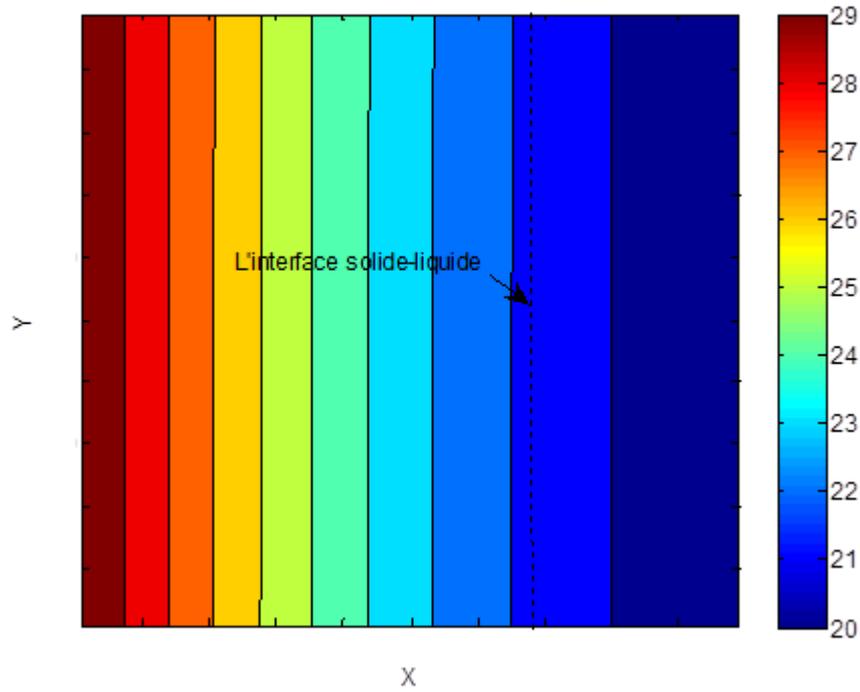


Fig. V.9. Evolution de la température du MCP à $t=10$ min.

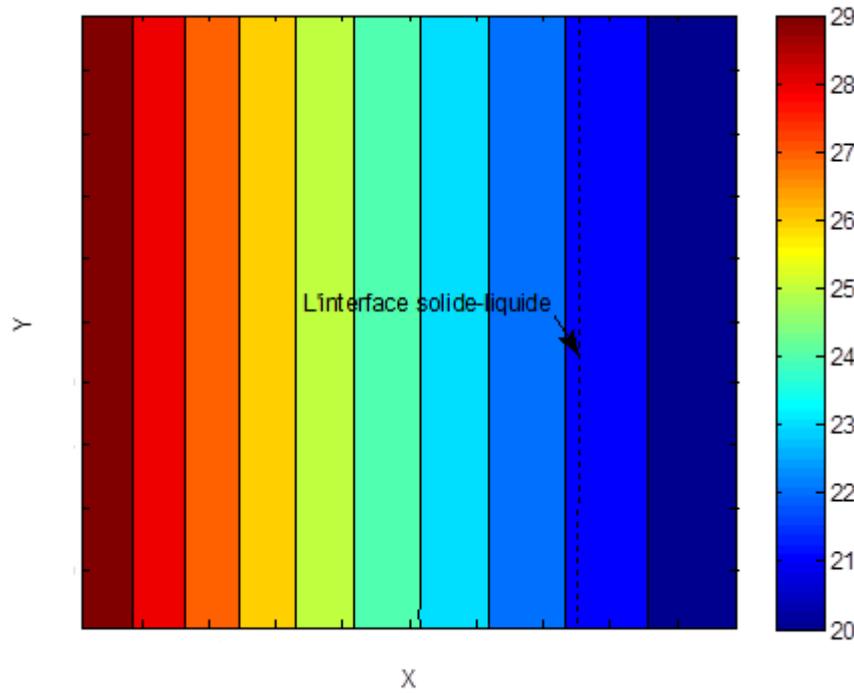


Fig. V.10. Evolution de la température du MCP à $t=15$ min.

Le déplacement de l'interface solide-liquide est illustré par la figure V.11. La position de l'interface est présentée à différents temps de la fusion du MCP (la cire de paraffine). Au début du processus de la fusion, l'interface est presque verticale, montrant ainsi la prédominance de la conduction.

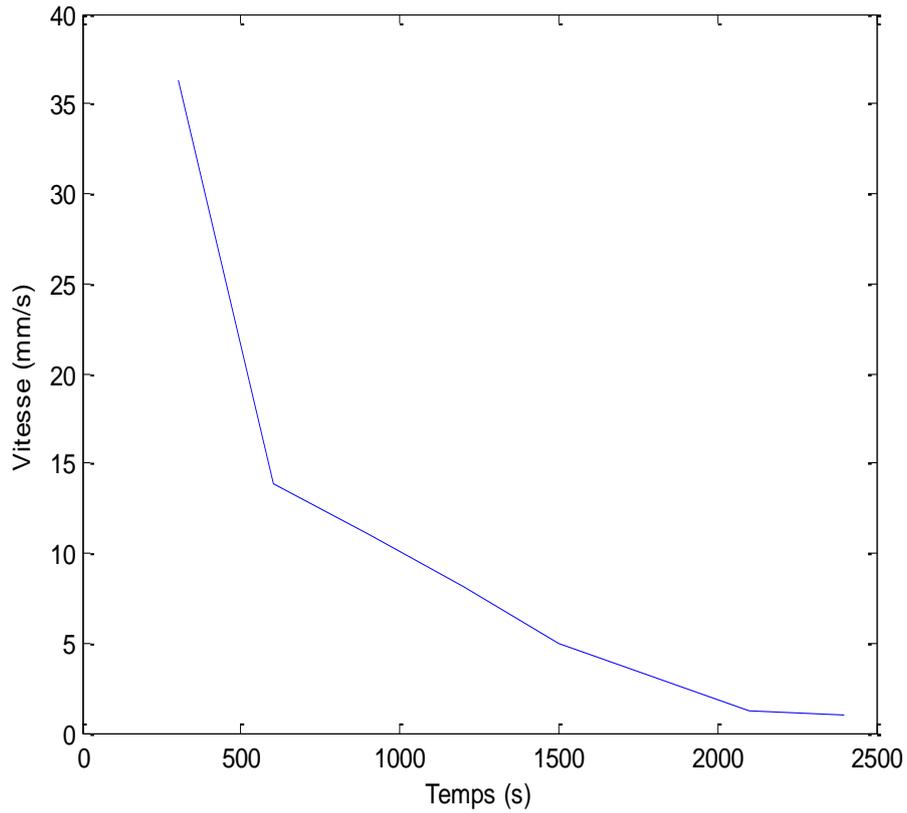


Fig. V.11. Evolution temporelle de la vitesse de l'interface solide-liquide.

V.5.4.2. Température de la toiture (PVT-MCP)

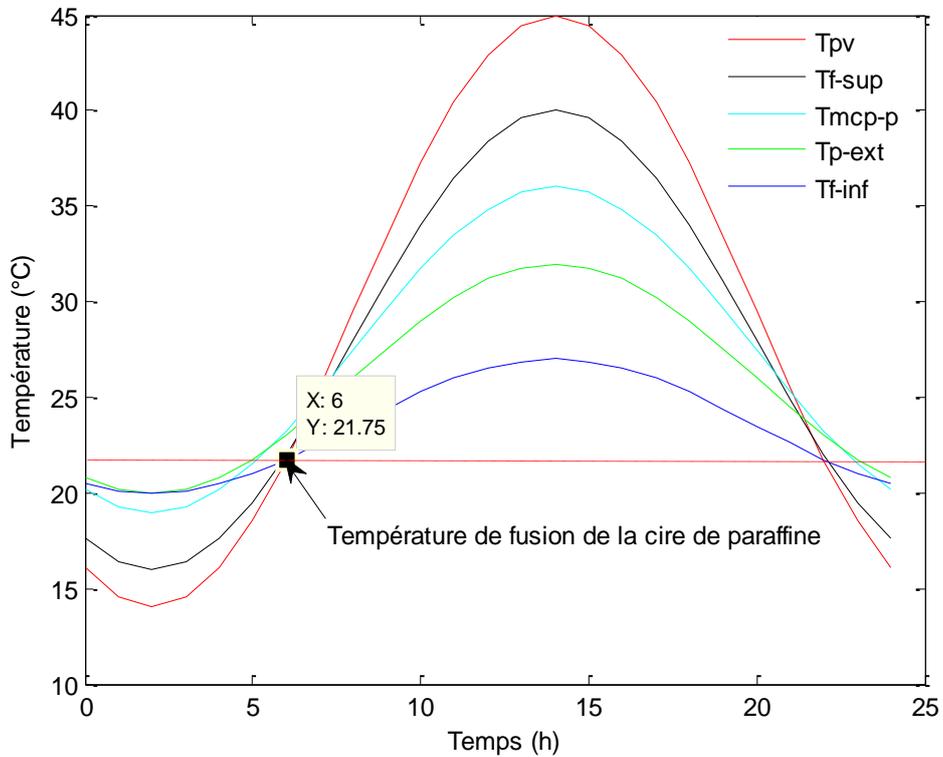


Fig. V. 12. Profil temporel de température de la toiture de l'extérieur vers l'intérieur (Ghardaia -Algérie).

Les courbes représentant la variation temporelle de la température de toutes les composantes du système (PVT- MCP) ont une allure similaire en forme de cloche (Figure V.12).

La toiture PVT recevant directement le rayonnement solaire aura tendance à s'échauffer plus que les autres composants. Il apparaît en outre que la température de fusion de la cire de paraffine débute approximativement à 21,7°C. Ainsi et du fait que la température des différents composants du système (PVT-MCP) est supérieure à cette valeur (21,7°C), le MCP utilisé (cire de paraffine) sera à l'état liquide pendant la journée (6^h- 22^h). Au de-là de 22^h, la température de MCP chute à une température inférieure à la température de fusion.

De plus, l'écart de température entre les surfaces intérieure des plaques de placoplâtre et la surface extérieure du panneau MCP conduit à des résultats identiques à ceux de la littérature, à savoir que les MCP utilisés en tant que complément d'isolation peuvent être le siège d'écart de température de 1°C à 7°C [76].

Au niveau de la face comprise entre le MCP et le placoplâtre, une moyenne des flux de l'ordre de 70 $W \cdot m^{-2}$ est enregistrée. En outre, les flux relevés sur la surface des plaques de placoplâtre sont relativement peu élevés, de l'ordre de 50 $W \cdot m^{-2}$. Cela explique que le panneau MCP stocke au maximum l'énergie thermique reçue et diminue le transfert de chaleur à l'intérieur de l'enceinte. Au cours de la nuit, le phénomène inverse est observé du fait du déstockage de l'énergie thermique.

Dès que la toiture PVT commence à recevoir un fort rayonnement solaire au cours de la journée, on observe un comportement inverse du MCP. Cela s'explique par le fait que le MCP stocke l'énergie thermique lorsqu'il atteint sa température de changement de phase. Ces résultats sont également en accord avec la littérature, à savoir que les matériaux à changement de phase peuvent stocker et céder une grande quantité d'énergie en tempérant les températures d'une pièce et retarder ainsi la montée ou la baisse de température de 2 ou 3 heures, lorsque le coût de l'électricité est plus élevé.

V.6. Conclusion

Dans ce chapitre, notre intérêt a porté sur l'intégration des matériaux à changement de phase dans les toitures (PVT-MCP). Les objectifs étaient d'évaluer l'impact des matériaux à changement de phase sur le confort thermique d'un bâtiment en environnement naturel, et d'exposer les méthodes numériques permettant de calculer les températures à l'intérieur de la

toiture (PVT-MCP). Le programme de simulation qui nous avons élaboré à l'aide du logiciel MATLAB est utilisé avec des conditions aux limites réelles. Les résultats obtenus sont en bon accord avec ceux de la littérature[76,81].

Conclusion générale

L'amélioration de l'efficacité énergétique des bâtiments constitue un enjeu majeur des politiques de maîtrise d'énergie qui se mettent progressivement en place. La finalité de ces mesures se résume en deux points, réduire les consommations d'énergie et limiter les effets du changement climatique.

Les énergies renouvelables constituent une alternative aux énergies fossiles à plusieurs titres, elles sont propres, gratuites et respectueuses de l'environnement.

Le capteur photovoltaïque est l'élément clé pour l'exploitation de l'énergie solaire, son rôle est de transformer le rayonnement solaire en courant à l'aide de matériaux semi-conducteurs. Néanmoins, le rendement faible d'un tel système reste un frein majeur à l'élargissement de l'utilisation de l'énergie solaire. L'examen de nouvelles voies pouvant conduire à une meilleure exploitation des sources d'énergies renouvelables à caractère intermittent ont retenu l'attention. Les matériaux de stockage par chaleur latente en font partie et peuvent être utilisés en tant que thermo régulateur dans divers procédés. En effet, l'emploi des matériaux à changement de phase permet de stocker/déstocker l'énergie provenant des apports solaires ou internes. Les applications au cas des constructions légères conduiront à une amélioration du confort thermique des usagers et à une réduction des consommations d'énergie.

C'est dans ce sens que l'étude de l'intégration des panneaux photovoltaïques et des panneaux de matériaux à changement de phase dans l'habitat a été menée.

Les objectifs sont d'évaluer l'impact des conditions climatiques sur la production de l'énergie électrique par un système photovoltaïque, et de proposer une modélisation et une simulation du comportement thermique de matériaux à changement de phase par des méthodes numériques.

Avant d'aborder ce volet, l'estimation du rayonnement solaire étant incontournable dans l'étude et la modélisation de tout système et/ou installation solaire et du fait du peu ou du manque de stations météorologiques, cinq modèles théoriques pour estimer l'éclairement solaire global sur une surface horizontale ont été étudiés. Le choix de ces modèles a reposé sur le fait qu'ils utilisent des données facilement disponibles (latitude et longitude du lieu), et peuvent donc être aisément appliqués à différents endroits pour prédire l'éclairement solaire global. La comparaison des résultats théoriques avec les données expérimentales de la station de mesure, utilisant le coefficient de corrélation (R^2), l'erreur quadratique moyenne (RMSE) permet de noter que les prédictions de ces modèles sont en accord avec les valeurs horaires

mesurées et peuvent donc être utilisés pour estimer l'éclairement solaire global pour un ciel clair. En outre, le modèle de Munner semble être le plus adéquat pour l'estimation de l'éclairement solaire incident sur une surface horizontale, même s'il ne présente que peu d'avantage par rapport à celui de R. Sun et aux trois autres modèles étudiés. Nous pouvons ainsi choisir d'utiliser aussi bien le modèle de Munner que celui de R. Sun pour calculer les éclairements instantanés incidents sur le toit d'un habitat à Ghardaïa, tout au long de l'année

Par ailleurs, la rentabilité d'un PV étant étroitement liée à sa disposition, les valeurs optimales de l'angle d'inclinaison des panneaux photovoltaïques dans la région de Ghardaia (Algérie) ont été déterminées par le développement et l'utilisation de la méthode de simulation de l'algorithme d'optimisation de colonies de fourmis (OCF). Le modèle de Muner est utilisé pour calculer le rayonnement solaire sur une surface horizontale et même surface inclinée.

Pour le second point (panneaux MCP), objet également de ce travail, les transferts de chaleur par conduction lors d'un changement de phase, de même que le mécanisme d'échange thermique à l'interface ont retenu notre attention.

Nous avons mené une étude sur la fusion du matériau (MCP) et développé des méthodes numériques pour les problèmes de changement de phase.

Les méthodes de la capacité apparente, enthalpique et variable de pas de temps, ont été mises au point pour simuler le problème de changement de phase solide-liquide à 1D et 2D. La seconde méthode permet de traiter le transfert de chaleur par conduction dans les deux phases solide et liquide et de prédire à tout instant, l'évolution de la température et la position exacte de l'interface solide-liquide. En outre l'avantage de cette dernière est de permettre de trouver très facilement la position exacte de l'interface solide-liquide en fonction du temps et de déterminer la vitesse de déplacement de l'interface sans avoir besoin d'utiliser l'expression de la condition à l'interface solide-liquide.

L'impact réel des MCP en termes de complément d'isolation thermique est examiné. Des méthodes numériques pour prédire leurs effets sur le champ de température et sur le confort thermique sont proposées.

Dans le modèle développé, les caractéristiques des panneaux modélisés utilisées sont issues de la société Du PontTM Energain^R. Il s'agit d'un panneau d'une épaisseur de 5 mm laminé entre deux feuilles d'aluminium et composé de 60 % de MCP insérés dans une structure polymérique.

Références bibliographiques

- [1] N. Belkacem, «Contribution à l'évaluation des performances énergétiques et environnementales d'un habitat individuel bioclimatique : cas de la maison pilote de Souidania –Alger- (Algérie)», Thèse de doctorat, université Hassiba Benbouali de Chlef, (2017).
- [2] M. Stanislas N.B. Brou, «Modélisation et commande d'un système de cogénération utilisant des énergies renouvelables pour le bâtiment», Thèse de doctorat, université Paris-Saclay, (2015).
- [3] International Energy Agency (IEA), «World energy outlook », (2018).
- [4] Service de la donnée et des études statistiques (SDES), «Chiffres clés de l'énergie», (2018).
- [5] Ministère de l'Energie, Algérie, «Bilan énergétique national de l'année 2017», (2018).
- [6] Ministère de l'Energie, Algérie, «Bilan énergétique national de l'année 2016», (2017).
- [7] Ministère de l'Energie, Algérie, «Bilan énergétique national de l'année 2014», (2015).
- [8] F. Chlela, «Développement d'une méthodologie de conception de bâtiments à basse consommation d'énergie», Thèse de doctorat, université de la Rochelle, (2008).
- [9] ADEME Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie, (2007).
- [10] H. Breesch, A. Bossaer, A. Janssens, «Passive cooling in a low-energy office building», *Solar Energy*, Vol.79 (6), pp. 682-696, (2005).
- [11] J. Pfafferott, H. Sebastian, M. Wambsganß, «Design, monitoring and evaluation of a low energy office building with passive cooling by night ventilation», *Energy and Buildings*, Vol. 36, pp. 455–465, (2004).
- [12] J Jreijiry, «Modélisation numérique des systèmes de ventilation hybride et développement de stratégies de contrôle associées pour les bâtiments résidentiels», Thèse de doctorat, université de la Rochelle, (2004).
- [13] N. Belkadi, «Développement d'une méthodologie d'assistance au commissionnement des bâtiments à faible consommation d'énergie», Thèse de doctorat, Université Paris-Est, (2008).
- [14] W. Feist, J. Schnieders, V. Dorer, A. Haas, «Re-inventing air heating: Convenient and comfortable within the frame of the Passive House concept», *Energy and Buildings*, Vol. 37, pp. 1186–1203, (2005).

- [15] F. Chlela, E. Fleury, C. François, D. Quenard, M. Weckstein, D. Caccavelli ,« Feuille de route vers des bâtiments neufs et existants très basse consommation énergétique voire à énergie positive», CSTB, Rapport DDD/DE/PEB 2005-067R, (2005).
- [16] W. Feist, S. Peper, M. Görg, « Final Technical Report », Cepheus, (2001).
- [17] P. Lecuelle, «La basse et très basse énergie dans l'habitat neuf et rénové», ALME, (2005).
- [18] S. Thiers, «Bilans énergétiques et environnementaux de bâtiments à énergie positive», Thèse de doctorat, École Nationale Supérieure des Mines de Paris, (2008).
- [19] V. Wittwer, K. Voss, «Solar Passiv-haus “Wohnen und Arbeiten“», Report TOS-1-0103-VK-02, Freiburg-im-Breisgau: Fraunhofer ISE, (2001).
- [20] S. Thiers, B. Peuportier, «Energy and environmental assessment of two high energy performance residential buildings», Building and Environment Vol. 51, pp. 276 – 284, (2012).
- [21] K. Schweitzer, «first passive office building», Proceedings Passiefhuis –Symposium, Belgium, (2005).
- [22] A.Goetzberger, G.Bopp, W. Griesshaber, W. Stahl, «The PV/hydrogen/oxygen-system of the self-sufficient solar house Freiburg», Conference record of the twenty third IEEE photovoltaic specialists conference, Louisville, pp. 1152–1158, (1993).
- [23] A.Goetzberger, W. Stahl, G.Bopp, W. Griesshaber, A. Heinzl, K. Voss, « The self-sufficient solar house Freiburg », Advances in Solar Energy, Vol 9. pp. 1–70, (1994).
- [24] A. Ricaud, «La Petite Maison ZEN», Dossier de présentation, Cythelia SARL, Chambéry, (2007).
- [25] C. Parka, G. Augenbroea, N. Sadeghb, M. Thitisawata, T. Messadic, «Real-time optimization of a double-skin façade based on lumped modeling and occupant preference», Building and Environment, Volume 39, pp. 939 – 948, (2004).
- [26] N. Artmann, H. Manz, , P. Heiselberg,. « Climatic potential for passive cooling of buildings by night-time ventilation in Europe », Applied energy, Vol 84 (2). pp. 187–201, (2007).
- [27] Y. Jannot, « Thermique solaire », Ecole des Mines Nancy, Edilivre, (2011).
- [28] N. Houcine, «Etude de gestion d'une mini-centrale solaire et mise au point d'un dispositif automatique de mesures, contrôles et régulation de l'énergie électrique », Thèse de doctorat, université des sciences et de la technologie d'Oran Mohamed Boudiaf, (2016).

- [29] E. Torlaschi, «Phénomènes Radiatifs dans L'atmosphère Terrestre», Automne, 2010).
- [30] I. Tabet, «Etude, Réalisation et simulation d'un capteur solaire», Thèse de doctorat, université Frères Mentouri Constantine 1, (2016).
- [31] N. Bachari, «Modélisation multi spectrale des images satellitaire, Application, quantification du bilan d'énergie sol Atmosphère », Thèse de doctorat, université des sciences et de la technologie d'Oran Mohamed Boudiaf, (2017).
- [32] R. Dogniaux, «L'influence de L'estimation du facteur total de Trouble atmosphérique sur L'évaluation du rayonnement solaire direct par ciel clair. Application aux données radiométriques de l'IRM à Uccle», Institut Royal Météorologique de Belgique (IRM), Miscellanea, Serie C,N°20, (1984).
- [33] 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), pp. 331 – 346, (2009).
- [34] F. Jafarkazemi, S. Ali Saadabadi, H. Pasdarshahri, «The optimum tilt angle for flat-plate solar collectors in Iran», J. renewable sustainable energy, Vol. 4 (1) 013118, pp. 1 – 15, (2012).
- [35] M.S. Mecibaha, T.E. Boukeliaa, R. Tahtaha, K. Gairaa, « Introducing the best model for estimation the monthly mean daily global solar radiation on a horizontal surface (Case study: Algeria)», Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol.36, pp. 194–202, (2014).
- [36] M.R. Yaïche, S.M.A. Bekkouche, «Conception et validation d'un programme sous Excel pour l'estimation du rayonnement solaire incident en Algérie. Cas d'un ciel totalement clair», Revue des Energies Renouvelables, Vol. 11 (3), pp. 423 – 436, (2008).
- [37] M. Bressan, «Estimation de production des installations PV pour différentes inclinaisons basée sur un modèle d'ensoleillement», la revue 3EI-SEE, Société de l'électricité, de l'électronique et des technologies de l'information et de la communication, (2014).
- [38] M. Capderou, «Atlas solaire de l'Algérie: modèles théoriques et expérimentaux», Office des Publications Universitaires, Tome.1, Vol. 1 et 2, Algérie, (1988).
- [39] O. Abdellatif, A. Benaoumeur, H.Masaoud, « Étude et analyse du gisement solaire pour une région désertique : Type Adrar», Communication Science & Technology N°21, COST, (2019).
- [40] M. Bensafi, B. Draoui, M. Hasnat, N. Kaid, « Elaboration d'un logiciel pour l'estimation de rayonnement solaire en Algérie», Journal of Science Research, Vol. 11 (4), pp. 20 – 24, (2001).

- [41] T. Muneer, «Solar radiation and daylight models», Napier university, Elsevier Ltd. all rights reserved, (2004).
- [42] S. Benkacali, K. Gairaa, « Techniques de modélisation de l'irradiation solaire sur un plan incliné», International Journal of Scientific Research & Engineering Technology, Vol.3, pp.102-108, (2015).
- [43] K. Bouchouicha, « Modélisation multi spectrale des images satellitaires- Application : Quantification du bilan d'énergie Sol-Atmosphère», Thèse de doctorat, U.S.T.O-MB, (2017).
- [44] M. Jamil, y. Ahmad, G. N. Tiwari, «Solar radiation models-A review», International Journal of Energy Research, Vol. 35, pp. 271–290, (2011).
- [45] S.M.A. Bekkouche, «Modélisation du comportement thermique de quelques dispositifs solaires», Thèse de Doctorat, université de Tlemcen, (2009).
- [46] P.G. Loutzenhiser, H. Manz, C. Felmann, P.A. Strachan, T. Frank, G.M. Maxwell, «Empirical validation of models to compute solar irradiance on inclined surfaces for building energy simulation », Solar Energy, Vol. 80, pp. 254–267, (2007).
- [47] C. Shen, Y. Ling , Y.W. Liu, W.Q. Tao, «Modelling and simulation of solar radiation data processing with Simulink», Simulation Modelling Practice and Theory, Vol. 16, pp.721–735, (2008).
- [48] R. Mubarak, M. Hofmann, S. Riechelmann, G. Seckmeyer, «Comparison of Modelled and Measured Tilted Solar Irradiance for Photovoltaic Applications», Energies, Vol. 10, pp.1–18, (2017).
- [49] I. Saouane, A. Chaker, B. Zaidi, C. Shekhar, «Optimal angle of polycrystalline silicon solar panels placed in a building using the ant colony optimization algorithm», European physical journal plus, Vol. 132, pp.1–8, (2017).
- [50] Y. Riffonneau, « Gestion des flux énergétiques dans un système photovoltaïque avec stockage connecté au réseau – application à l'habitat», Thèse de doctorat, université Joseph-Fourier - Grenoble I, (2009).
- [51] D. Dib, W. Guebabi, M. B. Guesmi, «Contribution to the Study and Optimal Exploitation of a Solar Power System for a Semi-Arid Zone (Case Study: Ferkéne, Algeria)», International Journal of Electrical, Computer, Electronics and Communication Engineering, Vol.7, (2013).
- [52] M. Adouane, « Etude de la fiabilité des systèmes solaires hybrides dans le Sahara», Thèse de doctorat, école nationale polytechnique, (2014).
- [53] D. Bigot, «Contribution à l'étude du couplage énergétique enveloppe / système dans le cas de parois complexes photovoltaïques (PC - PV)», Thèse de doctorat, Université de la Réunion, (2011).

- [54] M. Bouthaina, « Architectures intégrées de gestion de l'énergie pour les multi systèmes autonomes utilisant le stockage par accumulateurs », Thèse de doctorat, Université Frères Mentouri Constantine 1, (2018).
- [55] H. Mathieu, « Physique des semi-conducteurs et des composants électroniques », Edition Masson, Paris, (1990).
- [56] A. Luque, S. Hegedus, « Handbook of Photovoltaic Science and Engineering », John Wiley and Sons, Chichester, (2003).
- [57] S. Hamma, P. I. Cabarocas, « Low-temperature growth of thick intrinsic and ultrathin phosphorous or boron-doped microcrystalline silicon films: Optimum crystalline fractions for solar cell applications », Sol. En. Mat. Sol. C, Vol.69 (3), pp.217-239, (2001).
- [58] E.A. Kouadri Boudjelthia, « Les technologies photovoltaïques : Entre la recherche scientifique et la réalité économique », Bulletin des énergies Renouvelables N° 40, (2016).
- [59] Y. Hirata, T. Inasaka, T. Tani, « Output variation of photovoltaic modules with environmental factors II: seasonal variation », Solar Energy, Vol. 63, (3), pp. 185–189, (1998).
- [60] A. Kamei, S. Yoshida, H. Takakura, T. Minemoto, « Ten years outdoor operation of silicon based photovoltaic modules at central latitude of Japan », Renewable Energy, Vol. 65, pp. 78-82, (2014).
- [61] A. Laburet, M. Viloz, « Energie solaire photovoltaïque », Edition Dunod –Paris, (2006).
- [62] M. Messaoud, « modélisation et optimisation de systèmes de production d'énergies renouvelables couplés au réseau », Thèse de doctorat, Université Frères Mentouri Constantine 1, (2012).
- [63] S. Diafa, M. Belhamelb, M. Haddadic, A. Louche, « Technical and economic assessment of hybrid photovoltaic wind system with battery storage in Corsica island », Energy Policy, Vol.36, pp.743–754, (2008).
- [64] B. Bi, P. Gbaha, K. B. Koua, M. Koffi, « Dimensionnement et Gestion de l'Energie au Sein d'un Système Hybride de Production d'Energie », European Scientific Journal, Vol. 14. pp. 260-282, (2018).
- [65] J.P. Hannequant, E. Schanp, « Plan d'étapes pour panneaux photovoltaïques », Guide administratif et technique pour l'installation de panneaux photovoltaïques, Bruxelles, (2013).
- [66] C. Ribbe, « L'intégration du photovoltaïque dans une opération de logement social », Fiche technique, Association générale des organismes sociaux pour l'habitat en Poitou Charentes, (2013).
- [67] F. Antony, C. Düşner, K. Remmers, « Le photovoltaïque pour tous, Conception et Réalisation d'installations », INES, (2006).

- [68] APPER solaire, «Autoconsommation en photovoltaïque, principe et intérêt », (2013).
- [69] B. Ahmed, «Application des algorithmes de colonies de fourmis pour l'optimisation et la classification des images», Thèse de doctorat, université des sciences et de la technologie d'Oran Mohamed Boudiaf, (2013).
- [70] H. Soumeya, B. Khaled, « Deux stratégies parallèles de l'optimisation par colonie de fourmis », 4th International Conference: Sciences of Electronic, Technologies of Information and Telecommunications, IEEE, Tunisia, (2007).
- [71] M. R. Jalali, A. Afshar, M. A. Mariño, « Reservoir Operation by Ant Colony Optimization Algorithms», Iranian Journal of Science And Technology, Transaction Engineering, Vol. 30, No. B1, Shiraz University, Islamic Republic of Iran, (2006).
- [72] F. F. Showkat, « Time-Constrained Project Scheduling Problem With Activities Alternatives, Ant Colony Optimization Approach», Journal of Al-Nahrain University, Vol. 12 (1), pp.134-142, Iraq, (2007).
- [73] M. Telkes, «Thermal storage for solar heating and cooling», Proceedings of the Workshop on Solar Energy Storage Subsystems for the Heating and Cooling of Buildings», Charlottesville, Virginia, USA, (1975).
- [74] J. P. Dumas, «Stockage du froid par chaleur latente», Proceedings of the 2nd national passive solar conference Philadelphia, PA, USA, (1978).
- [75] A. Maha, « Thermal testing and numerical simulation of a prototype cell using light wallboards coupling vacuum isolation panels and phase change material», Energy and Buildings, Vol. 38 (6), pp.673-681, (2006).
- [76] S. Guichard, «Contribution à l'étude des parois complexes intégrant des matériaux à changement de phase : modélisation, expérimentation et évaluation de la performance énergétique globale», Thèse de doctorat, Université de La Réunion, (2016).
- [77] S. E. Ango, «Contribution au stockage d'énergie thermique en bâtiment : développement d'un système actif à matériaux à changement de phase», Thèse de doctorat, Ecole Nationale Supérieure d'Arts et Métiers, (2011).
- [78] A.K. Athienitis, C. Liu, D. Hawes, D. Banu, D. Feldman, « Investigation of the thermal performance of a passive solar test-room with wall latent heat storage», Building and Environment, Vol. 32 (5), pp.673-681, (1997).
- [79] J. L. Bourdeau, «Study of two passive solar systems containing phase change materials for thermal storage», Rev. Phys. Appl, Vol. 15(3), pp.60-66, (1980).
- [80] D.A. Neeper, « Thermal dynamics of wallboard with latent heat storage», Solar Energy, Vol. 68(5), pp.393-403, (2000).

- [81] S. Drissi, «Développement de nouveaux bétons "accumulateurs d'énergie" investigations expérimentale, probabiliste et numérique du comportement thermique», Thèse de doctorat, université Paris-Est, (2015).
- [82] A. Maha, «Nouveaux composants actifs pour la gestion énergétique de l'enveloppe légère des bâtiments. Couplage matériaux à changement de phase, super-isolation, apports solaires », Thèse de doctorat, université Joseph Fourier Grenoble,(2004).
- [83] N. Soares, J.J. Costa, A.R. Gaspar, P, Santos, « Review of passive PCM latent heat thermal energy storage systems towards buildings energy efficiency», *Energy and Buildings*, Vol.59, pp. 82–103, (2013).
- [84] S. Zhou, « Crowd modeling and simulation technologies, *ACM Transactions on Modeling and Computer Simulation*», *Crowd Modeling and Simulation Technologies*, Vol.20, pp. 1–34, (2010).
- [85] S. Haghshenaskashani, H. Pasharshahi, « Simulation of Thermal Storage Phase Change Material in Buildings», *World Academy of Science, Engineering and Technology*, Vol.34, (2009).
- [86] L.F. Cabeza, C. Castell, M. Nogués, M. Medrano, R. Leppers, O. Zubillaga,« Use of micro encapsulated PCM in concrete walls for energy savings », *Energy and Buildings*, Vol. 39 (2), pp. 113–119, (2007).
- [87] A. Pasupathy, R. Velraj, «Effect of double layer phase change material in building roof for year round thermal management», *Energy and Buildings*, Vol.40, pp. 193–203 , (2008).
- [88] F. Kuznik, J. Virgone, K. Johannes, «Development and validation of a new TRNSYS type for the simulation of external building walls containing PCM», *Energy and Buildings*, Vol. 42 (7), pp. 1004–1009, (2010).
- [89] F. Kuznik, J. Virgone, K. Johannes, « In-situ study of thermal comfort enhancement in a renovated building equipped with phase change material wallboard», *Renewable Energy* , Vol.36 (5), pp. 1458–1462, (2011).
- [90] A. Joulin, Z. Younsi, L. Zalewski, S. Lassue, D.R. Rousse, J.-P. Cavrot «Experimental and numerical investigation of a phase change material: thermal-energy storage and release », *Building and Environment*, Vol.42 (6), pp. 2197–2209, (2007).
- [91] M. Koschenz, B. Lehmann, « Development of a thermally activated ceiling panel with PCM for application in lightweight and retrofitted buildings », *Energy and Buildings*, Vol. 36 (6), pp. 567–578, (2004).
- [92] A. Pasupathy, R. Velraj, R.V. Seeniraj, « Phase change material-based building architecture for thermal management in residential and commercial establishments», *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 12 (1), pp.39–64, (2008).

- [93] A. Castell, I. Martorell, M. Medrano, G. Pérez, L.F. Cabeza, « Experimental study of using PCM in brick constructive solutions for passive cooling», *Energy and Buildings*, Vol. 42 (4), pp. 534–540, (2010).
- [94] D. Heim, « Isothermal storage of solar energy in building construction», *Renewable Energy*, Vol. 35, pp. 788–796, (2010).
- [95] K.A.R. Ismail, « U-values, optical and thermal coefficients of composite glass systems», *Renewable Energy*, Vol. 35, pp. 788–796, (2010).
- [96] V.V. Taygi, D. Buddhi, «PCM Thermal storage in buildings a state of art» *Renewable and sustainable Energy Reviews*, Vol. 11 (6), pp. 1146-1166, (2006).
- [97] H. Mehling, « Strategic project ‘Innovative PCM-Technology results and future perspectives», in: 8th Expert Meeting and Workshop, Kizkalesi, Turkey, April 18–20 April, (2009).
- [98] N. Taieb, « Etude du refroidissement des cellules photovoltaïques par un matériau à changement de phase», Thèse de doctorat, université des sciences et de la technologie d'Oran Mohamed Boudiaf, (2016).
- [99] V. Voller, M. Gross, «Accurate solutions of moving boundary problems using the enthalpy method », *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 24, pp.545-556, (1980).
- [100] L. Blanc, «Modélisation du panneau solaire hybride solaire2G », Institut Universitaire des Systèmes Thermiques Industriels, CNRS/université de Provence, (2015).
- [101] A. Bykalyuk, «Contribution à l'étude des échanges convectifs à l'interface de paroi en présence de matériaux à changement de phase : Application au bâtiment», Thèse de doctorat, INSA de Lyon, France, (2014).
- [102] <https://fr.climate-data.org/afrique/algerie/ghardaia/ghardaia-1046398/>
- [103] K.A. Brucker, J. Majdalani, «Equivalent thermal conductivity for compact heat sink models based on the Churchill and Chu correlation», *IEEE Transactions on Components and Packaging Technologies*, Vol. (26), pp. 158-164, (2003).
- [104] F. Alamdari, G.P. Hammond, « Improved data correlations for buoyancy-driven convection in rooms», *Building Services Engineering Research and Technology*, Vol. (4), pp. 106-112, (1983).
- [105] H.B Awbi, A. Hatton, « Investigation into Heat Transfer Mechanisms in Enclosures», *Sustainable Building Conference BEPAC/EP SRC*, (1995).

الفعالية الطاقوية: السكن الأقل استهلاك للطاقة

ملخص

يتطلب الوضع الحالي للطاقة اجاد بعض الحلول المختلفة للتحكم فيها وتوفيرها من خلال الاستخدام الأمثل لمواردها المتاحة، خاصة منها تلك التي تعتبر صديقة للبيئة مثل الطاقات المتجددة. يعد قطاع السكن في الجزائر الأكثر استهلاك للطاقة . وبالتالي من أجل المساعدة في تلبية احتياجات الطاقة في هذا القطاع والحد ليس فقط من كمية الطاقة التقليدية المستخدمة ولكن أيضا من الغازات المنبعثة والمسببة للاحتباس الحراري ، فإن استغلال الطاقة الشمسية يعتبر بلا شك أفضل طريقة و هذا بسبب توفرها في بلادنا.

تمثل هذه الأطروحة جزء من مجالات الاستغلال الأمثل للطاقة في قطاع السكن و الهدف منها هو استخدام بعض الحلول النشطة والخاملة من اجل تحقيق فعالية طاقوية عالية.

الحلول المقترحة هي ادماج الألواح الكهروضوئية في المباني من جهة، واستخدام مواد تغيير الطور (MCP) كألواح في الأسقف الكهروضوئية الحرارية (PVT-MCP) من جهة اخرى. اولا تم تزويد المبنى بالألواح الكهروضوئية ،مع تحديد القيم المثلى لزاوية ميل هذه الألواح في موقع بغرداية (الجزائر) من خلال تطوير واستخدام طريقة المحاكاة لحوارزمية تحسين مستعمرة النمل (OCF) باستخدام نموذج Munnner لحساب الإشعاع الشمسي على الأسطح الأفقية والمائلة.

بالنسبة للاقتراح الثاني، تم استخدام المواد المستقرة الصلبة والسائلة لتخزين الطاقة الحرارية في شكل حرارة كامنة. تم فحص التأثير الحقيقي لـ MCP من حيث العزل الحراري الإضافي ، واقتراح طرق عديدة للتنبؤ بتأثيراتها على حقل درجة الحرارة والرفاهية الحرارية.

في النموذج الذي تم تطويره ، استعملنا خصائص الألواح النموذجية لشركة *Du Pont™ Energain®*.

الكلمات المفتاحية: البناية BCE، الألواح PV، طريقة مستعمرة النمل (OCF)، الألواح MCP.

Energy efficiency: low energy consumption habitat

Abstract

In context of the current energy requirements for different processes, the implementation of various control and energy saving solutions respectful of the environment is of utmost importance. This objective can be achieved through the optimal use of energy from available resources such as use of renewable energies. In Algeria, the building sector is the most energy-intensive. Thus, in order to help to meet the energy needs of this sector and reduce the share of conventional energy used and the greenhouse gas emissions, the solar energy is undoubtedly the better way to exploit due to its abundance in our country.

This thesis is part of aforementioned approach to energy management in the building sector. The goal is to use active and passive solutions to achieve high energy performance. The proposed solutions are the integration of photovoltaic panels in buildings, on the one hand and the use of phase change materials (PCM) such as roof panels (PVT-MCP), on the other hand. For the first, the aim shall be to meet the energy needs of a habitat by use of photovoltaic panels. Simulation method utilizing ant colony optimization algorithm (OCF) is developed and employed to determine the optimal values of the angle of inclination of the photovoltaic panels placed at the Ghardaia site (Algeria). The Muneer model is used to calculate solar radiation falling on horizontal and inclined surfaces.

For the second proposal, solid-liquid materials in the stabilized form are used to store thermal energy in the form of latent heat. The real impact of PCM in terms of additional thermal insulation is examined and numerical methods to predict their impacts on the temperature field and thermal comfort are proposed. In the model developed, the characteristics of the panels modeled were obtained from DuPontTM Energain^R.

Keywords: Habitat CEB, Panels PV, Ant colony optimization method (OCF), PCM Panels.

Résumé

Le contexte énergétique actuel impose la mise en place de diverses solutions de maîtrise et d'économie de l'énergie par l'utilisation optimale de ressources énergétiques disponibles et respectueuses de l'environnement, telles que les énergies renouvelables. En Algérie, le secteur du bâtiment est le plus énergivore. Ainsi et afin de contribuer à satisfaire les besoins énergétiques de ce secteur et de réduire non seulement, la part des énergies conventionnelles utilisées, mais également les émissions de gaz à effet de serre engendrées, le solaire de par sa disponibilité dans notre pays est sans doute la meilleure voie à exploiter.

Cette thèse s'inscrit dans cette démarche de maîtrise de l'énergie dans le secteur du bâtiment. L'objectif est d'utiliser des solutions actives et passives pour atteindre de hautes performances énergétiques.

Les solutions proposées sont l'intégration des panneaux photovoltaïques dans les bâtiments, d'une part et l'utilisation de matériaux à changement de phases (MCP) comme des panneaux dans les toitures (PVT-MCP), d'autre part. Pour la première, il s'agira d'alimenter un habitat par des panneaux photovoltaïques. Les valeurs optimales de l'angle d'inclinaison des panneaux photovoltaïques sur le site de Ghardaia (Algérie) ont été déterminées par le développement et l'utilisation de la méthode de simulation de l'algorithme d'optimisation de colonie de fourmis (OCF). Le modèle de Muneer est utilisé pour calculer le rayonnement solaire sur des surfaces horizontale et inclinée.

Pour la seconde proposition, des matériaux à forme stabilisée solide –liquide, sont utilisés pour stocker l'énergie thermique sous forme de chaleur latente. L'impact réel des MCP en termes de complément d'isolation thermique est examiné et des méthodes numériques pour prédire leurs effets sur le champ de température et sur le confort thermique sont proposées. Dans le modèle développé, les caractéristiques des panneaux modélisés sont issues de la société Du PontTM Energain^R

Mots clés : Habitat BCE, Panneaux PV, Méthode de colonie de fourmis (OCF), Panneaux MCP.