République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université Kasdi Merbah Ouargla

Faculté des sciences appliquées

Département de Génie des Procédés

THESE

Présentée pour l'obtention du diplôme de

DOCTORAT ES SCIENCES

Option : Génie des Procédés

Présentée par

GHEDAMSI Rebha

Développement d'une méthodologie de conception de bâtiments à énergie positive en Algérie

Soutenu publiquement le : 16/12/2018

Membres du jury :

Boubekeur	DOKKAR	Maitre de conférences (A)	Président	Univ. Ouargla
Noureddine	SETTOU	Professeur	Directeur de thèse	Univ. Ouargla
Mahfoud	KADJA	Professeur	Examinateur	Univ. Constantine
Sidi Mohammed El-Amine	BEKKOUCHE	Directeur de recherche	Examinateur	URAER.Ghardaïa

Année universitaire 2018/2019

Remerciements

Avant tout, je remercie ALLAH, le tout puissant, de m’avoir donné le courage et la volonté pour accomplir ce travail de recherche.

Je tiens à remercier sincèrement, et exprimer ma profonde reconnaissance et mon grande estime à mon directeur de thèse le Professeur Settou Noureddine, qui s'est toujours montré à l'écoute et à été très disponible tout au long de la réalisation de cette these malgré ses charges académiques, ainsi que pour, l'aide et le temps qu'il a bien voulu me consacrer.

Mes vifs remerciements vont à monsieur Boubekeur Dokkar, maitre de conférences à l’université Kasdi Merbah Ouargla, de m’avoir fait l’honneur de présider le jury de thèse.

Je tiens également à remercier mes examinateurs monsieur KADJA Mahfoud Professeur à l’université de Constantine et monsieur Sidi Mohammed El-Amine Bekkouche Directeur de Recherche à l’Unité de Recherche Appliquée en Energies Renouvelables de Ghardaïa, qui ont montré un intérêt pour mon travail et accepté d’assister à ma soutenance.

Mes remerciements les plus sincères à toutes les personnes qui auront contribué de près ou de loin au bon déroulement de cette thèse. Notamment, KHAMOULI Adem, DOKKAR Abdelghani, GOUAREH Abderrahmane, RAHMOUNI Soumia, RECIOUI Bakhta, SAIFI Nadia, ROBBI Sarra, avec qui j’ai passé de bons moments et qui m’ont apporté tout leur soutien.

Sommaire

	Page
Nomenclature	i
Listes des figures	iv
Liste des tableaux	x
Introduction générale	1
Chapitre 1 : Contexte énergétique Mondial et Algérien	
1.1. Introduction	
1.2. Principaux enjeux énergétiques à l'échelle de la planète	4
1.2.1. Ressources énergétiques mondiales	4
1.2.2. Demande énergétique mondiale	6
1.2.3. Consommation énergétique mondiale	7
1.2.4. Consommation d'énergie dans le secteur résidentiel	9
1.3. Impact environnemental	9
1.4. Contexte énergétique en Algérie	11
1.5. Réserves, production et consommation	12
1.6. Technologies de conversions	18
1.6.1. Photovoltaïque (PV)	18
1.6.1.1. Silicium cristallin	19
1.6.1.2. Couches minces	19
1.6.1.3. Cellules organiques	19
1.6.2. Eolien	20
1.7. Systèmes hybride	20
1.7.1. Classification	20
1.7.1.1. Régime du fonctionnement	21
1.7.1.2. Structure du système hybride	21
1.8. Présentation du Programme National des Energies Renouvelable (PNER)	22
1.9. Consommation d'énergie dans le secteur résidentiel en Algérie	24
1.10. Démographie et parc de logements	25
1.10.1. Evolution du parc logement	25
1.10.2. Taux d'occupation	27

1.10.3. Nombre des personnes par logement 27
1.10.4. Taux d'électrification et de raccordement en gaz naturel 28
1.11. Efficacité énergétique 29
1.11.1. Politique d'efficacité énergétique en Algérie 30
1.11.2. Programme ECO-BAT 31
1.11.3. Programme triennal d'efficacité énergétique 2011-2013 33
1.11.4. Programme de développement quinquennal 2010-2014 34
1.11.5. Nouveau programme national sur l'efficacité énergétique (2016-2030) 34
1.12. Classification des bâtiments a efficacités énergétiques 35
1.12.1. Bâtiment à Basse Consommation Energétique (basse énergie) 35
1.12.2. Bâtiments passifs 36
1.12.3. Bâtiments autonomes 36
1.12.4. Bâtiments zéro énergie ou à énergie positive 37
1.12.4.1. Exemples de réalisation 37
1.13. Conclusion 39

Chapitre 2: Etat de l'art sur l'interaction climat et bâtiment

2.1. Introduction 40
2.2. Historique des bâtiments 40
2.3. Repères conceptuels de l'habitat à travers l'histoire 42
2.3. 1. Repères conceptuels naturels 42
2.3. 1.1. Climat 43
2.3. 1.2. Site 43
2.3. 1.3. Matériaux de construction 45
2.3. 1.4. Paysage 45
2.3. 2. Repères conceptuels sociaux 46
2.3. 2.1.Stratifications sociales 46
2.3. 2.2. Organisation sociale élargie 47
2.3.2.3. Organisation sociale restreinte 48
2.3.3. Repères conceptuels culturels 49
2.4. Confort thermique 52
2.4.1. Notion de confort 52
2.4.2. Confort dans l'habitat 52

2.4.3. Confort thermique 52
2.4.4. Bilan thermique 53
2.4.5. Echanges thermiques avec l'environnement 54
2.4.5.1. Echange thermique par conduction 54
2.4.5.2. Echange thermique par convection 55
2.4.5.3. Echange thermique par rayonnement 55
2.4.5.4. Echange thermique par évaporation 55
2.4.5.5. Echange thermique par respiration 56
2.5. Evaluation du confort thermique 56
2.5.1. Méthode de diagramme bioclimatique de Givoni 56
2.5.2. Méthode des indices PMV et PPD 57
2.6. Facteurs influant sur le confort thermique 57
2.6.1. Facteurs liés aux conditions climatiques 58
2.6.1.1. Température de l'air intérieur et des parois 58
2.6.1.2. Humidité de l'air 58
2.6.1.3. Vent 58
2.6.1.4. Radiation solaire 59
2.6.2. Facteurs liés à la conception 59
2.6.2.1. Orientation 59
2.6.2.2. Morphologie de l'habitat 61
2.6.2.3. Albédo 62
2.6.2.4. Microclimat 63
2.6.2.5. Ventilation 64
2.6.2.6. Lumière 65
2.6.2.7. Isolation thermique 65
2.7. Matériaux à Changement de Phase (MCP) 66
2.8. Conclusion 68

Chapitre 3: Simulation numérique du comportement thermique des parois couplant Matériaux à Changement de Phase

3.1. Introduction 70
3.2. Choix du matériau à changement de phase 70
3.2.1. Description du problème 71

3.2.2. Modèle mathématique 71
3.2.2.1. Conditions initiales et aux limites 73
3.2.2.2. Processus de calcul 74
3.2.2.3. Validation des procédures de calcul 75
3.2.3. Cas étudiés 77
3.2.3.1. Grandeurs analysées 79
3.2.3.2. Propriétés thermophysiques des matériaux 79
3.2.3.3. Variation de la température de la surface intérieure en fonction de la concentration et le type de MCP 80
3.2.3.4. Comparaison des simulations pour différents MCPs 83
3.3. Effet de l'orientation de mur sur la concentration optimale de MCP 87
3.3.1. Effet de l'orientation sur la température intérieure d'un mur vertical 88
3.3.1.1. Modèle physique 88
3.3.1.2. Modèle mathématique 89
3.3.1.3. Les conditions initiales et aux limites 90
3.3.2. Analyse économique 97
3.4. Conclusion 100

Chapitre 4: État de l'art de la démarche prospective énergétique et classification des modèles existants

4.1. Introduction 102
4.2. Fondement de la démarche prospective 102
4.3. Méthodes prospectives dans l'analyse des besoins énergétiques 103
4.3.1. Analyse structurelle 104
4.3.2. Consultation d'experts 104
4.3.3. Méthode des impacts croisés 105
4.3.4. Scénarios 105
4.4. Grandes phases de la méthode des scénarios 107
4.4.1. Délimitation du système 108
4.4.2. Représentation dynamique du système 108
4.4.3. Simulation rétrospective et prospective relative aux variables du système 109
4.4.4. Balayage du champ des possibles et la réduction de l'incertitude 109
4.4.5 Construction de scénarios 109
4.4.6. Élaboration de stratégie 109

4.5. Techniques de la modélisation des consommations énergétiques 110
4.5.1. Modèles top-down ou macroéconomiques (approche descendante) 110
4.5.2. Modèles bottom-up ou technologiques (ascendante) 112
4.5.2.1. Technique statistiques 112
4.5.2.2. Approche par ingénierie ou par caractéristiques physiques du bâtiment 113
4.5.3. Avantages et limites des approches de modélisation bottom-up et top-down 114
4.5.4. Modèles hybrides 115
4.6. Application des modèles à l'étude prospective de la demande d'énergie du secteur résidentiel à l'échelle internationale 116
4.7. Application des modèles à l'étude prospective de la demande d'énergie du secteur résidentiel à l'échelle nationale 121
4.8. Conclusion 124

***Chapitre 5:* Prospective de la redemande énergétique à l'horizon 2040**

5.1. Introduction 125
5.2. Méthodologie et hypothèses 126
5.2.1. Modélisation de la consommation d'énergie par type d'usage final 127
5.2.1.1. Demande d'énergie pour le chauffage et le refroidissement 128
5.2.1.2. Méthode de degré-jours 129
5.2.1.3. Besoins thermiques annuels de chauffage et de refroidissement 129
5.2.1.4. Habitat étudie 130
5.2.1.5. Système d'Information Géographique (SIG) pour le zonage climatique 131
5.2.2. Détermination du nombre de ménages pour chaque zone 137
5.2.3. Demande d'énergie pour l'eau chaude sanitaire (ECS) et les équipements électroménagers 140
5. 2.4. Consommation d'énergie finale et coût par ménage et par zone 140
5.3. Prévision de la consommation d'énergie dans le secteur résidentiel à l'horizon 2040 142
5.3.1. Hypothèses de prévision 143
5.3.1.1. Population 143
5.3.1.2. Parc des logements 144
5.3.1. 3. Raccordements en électricité et en gaz naturel 145

5.3.2. Description des scénarios 145
5.3.2.1. Scénarios tendanciel (business as usual) 146
5.3.2.2. Scénarios volontariste 146
5.4. Analyse de résultats 150
5.4.1. Demande d'énergie finale dans le scénario tendanciel 150
5.4.2. Demande d'énergie pour l'éclairage dans les différents scénarios 151
5.4.3. Demande énergétique et coûts totaux du système de conditionnement d'air dans les différents scénarios 152
5.4.3.1. Économie d'énergie pour le refroidissement dans le scénario volontariste 153
5.5. Conclusion 155

Chapitre 6. Développement d'une méthodologie de conception de bâtiments à énergie positive et applications

6.1. Introduction 156
6.2. Méthodologie 157
6.2.1. Description de l'étude de cas 160
6.2.2. Profil de consommation d'énergie 161
6.2.2.1. Consommation d'énergie pour le chauffage et le refroidissement 161
6.2.2.2. Besoins énergétiques pour l'eau chaude sanitaire 162
6.2.2.3. Eclairage et équipements électroménagers 162
6.3. Modélisation du système énergétique hybride 163
6.3.1. Energie produite par un module photovoltaïque (PV) 163
6.3.2. Energie produite par un aérogénérateur éolien 164
6.4. Besoins énergétiques 167
6.5. Dimensionnement du système d'énergie hybride 168
6.6. Impact environnemental 170
6.7. Indicateurs économiques 170
6.7.1. Coût initial 171
6.7.2. Coût de maintenance 172
6.7.3. Coût de renouvellement des composants 172
6.8. Résultats et discussions 173
6.8.1. Profil de consommation d'énergie 173
6.8.2. Détermination du couple de système hybride (N_{wt}, N_{pv}) pour atteindre un 175

bâtiment à énergie positive selon l'approche économique
6.8.3. Premier scénario 176
6.8.4. Deuxième scénario 177
6.8.5. Aspect économique 180
6.9. Conclusion 182
Conclusion générale 184
Bibliographie 189
Annexe 200

Nomenclature

Normales		Unité
COP	Coefficient de performance du dispositif de climatisation	-
C_{el}	Coût d'électricité	$/kWh
C_c	Coût annuel d'énergie par unité de surface du mur pour le refroidissement	$/m^2
C_r	Coût annuel d'énergie par unité de surface du mur pour le chauffage	$/m^2
C_f	Coefficient de forme	m^{-1}
C_i	Coût d'isolation par unité de surface du mur	$/m^2
C_{MCP}	Coût de MCP par unité de volume	$/m^3
C_{RES}	Echanges par convection respiratoire (respiration sèche)	W/m^2
C_t	Coût total	$/m^2
E_{CO_2}	Emission de CO_2 évitée des systèmes conventionnels	kg
E_{Con}	Energie produite par les systèmes conventionnels	kWh
E_{RAD}	Echanges par rayonnement	W/m^2
E_{CONV}	Echanges par convection	W/m^2
E_{COND}	Echanges par conduction	W/m^2
E_{SW}	Echanges par évaporation de la sueur	W/m^2
E_{DIF}	Echanges par diffusion de la vapeur d'eau	W/m^2
E_{RES}	Echanges par évaporation respiratoire	W/m^2
F_E	Facteur d'émission de CO_2	kg/kWh
g	Taux d'inflation	%
H	Production de chaleur interne (surfacique)	W/m^2
i	Taux d'intérêt	%
I_a	Rayonnement global horaire sur une surface horizontale	W/m^2
I_d	Rayonnement direct horaire sur une surface horizontale	W/m^2
I_y	Rayonnement diffus horaire sur une surface horizontale	W/m^2
k_{MCP}^{liq}	Conductivité thermique du MCP en phase liquide	W/m°C
k_{MCP}^{sol}	Conductivité thermique du MCP en phase solide	W/m°C
L	Epaisseur de la couche de plâtre/MCPs	m

n	Durée de vie	Ans
PWF	Facteur de la valeur actuelle	-
Q_r	Gain annuel de la chaleur	kWh/m^2
r	Taux d'actualisation	%
S	Stockage dans l'organisme	W/m^2
S_e	Surface de l'enveloppe	m^2
V	Volume habitable	m^3
Symboles grecques		
η_S	Efficacité du système de chauffage	-
ρ_{MCP}^{liq}	Masse volumique du MCP en phase liquide	kg/m^3
ρ_{MCP}^{sol}	Masse volumique du MCP en phase solide	kg/m^3
Abréviation		
AIE	Agence internationale de l'énergie	
APRUE	Agence pour la Promotion et la Rationalisation de l'Utilisation de l'Energie	
BTP	Bâtiment et Travaux Publics	
CDER	Centre de Développement des Energies Renouvelables	
CERTECH	Centre De Ressources Technologiques En chimie, Seneffe Belgique	
CNERIB	Centre National d'Etudes et de Recherches Intégrées du Bâtiment	
CREG	Commission de Régulation de l'Electricité et du Gaz	
DTR	Documents Techniques Réglementaires	
FNER	Fonds National des Energies Renouvelables	
FNME	Fonds National de Maîtrise de l'Energie	
GIEC	Groupe d'Experts Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat	
ISE	Institut Fraunhofer de recherche solaire européen	
LBC	Lampe Basse Consommation	
MCP	Matériaux à changement de phase	
MCPs	Matériau à changement de phase microencapsulé	
ME	Ministère de l'Energie	

OCDE	Organisation de Coopération et de Développement Economiques
ONM	Office National de la Météologie
ONS	Office National des Statistiques
OPGI	Office de Promotion et de Gestion Immobilière
PV	Photovoltaïque
RGPH	Recensement Général de la Population et de l'Habitat
SIG	Système d'Information Géographique
SNAT	Schéma National d'Aménagement du Territoire
Sonatrach	Société national de transport et de commercialisation des hydrocarbures
Sonelgaz	Société Nationale de l'Electricité et du Gaz
TCAM	Taux d'Accroissement Annuel Moyen
TEP	Tonne Equivalent Pétrole
URAER	Unité de Recherche Appliquée en Energies Renouvelables

Liste des figures

	Chapitre 1: Contexte énergétique Mondial et Algérien	
Fig 1. 1	Evolution de la demande mondiale pour l'énergie primaire entre 1971-2015 par source	5
Fig 1.2	Contribution de chaque source dans la demande mondiale en énergie primaire pour 1973 et 2015	6
Fig 1.3	Consommation énergétique globale	7
Fig 1.4	Consommation finale d'énergie mondiale par secteur en 2014	9
Fig 1.5	Scénarios d'émissions de GES pour la période 2000-2100 (en l'absence de politiques)	10
Fig 1.6	Structure de la production d'énergie primaire	11
Fig 1. 7	Carte d'irradiations solaires reçues sur un plan horizontal en kWh/m^2 an développée sous Arc GIS 9	15
Fig 1. 8	Carte de la vitesse du vent en m/s développée sous GIS 9.3	16
Fig 1. 9	Carte des ressources géothermiques	17
Fig 1.10	Technologies d'éoliennes, (a) à axe horizontal et (b) à axe vertical	20
Fig 1. 11	Classification des systèmes hybride	22
Fig 1.12	(a) Structure de la consommation finale par secteur d'activité, (b) Mix énergétique du secteur résidentiel en 2015	24
Fig 1.13	Evolution de la consommation d'énergie finale des différents secteurs d'activité	25
Fig 1.14	Evolution du parc logement (1966 – 2012)	26
Fig 1.15	Répartition du parc total de logement selon le type de construction en	26

2008

Fig 1.16 Evolution du nombre des logements occupés 27

Fig 1.17 Evolution du nombre des personnes par ménage 28

Fig 1.18 Onze wilayas dont le projet des BHE sera réalisé 32

Fig 1.19 Vues de la maison à énergie positive de Fellbach 38

Chapitre 2: Etat de l'art sur l'interaction climat et bâtiment

Fig 2.1 Habitat troglodyte à Matmata 43

Fig 2.2 Groupement dispersé: Habitat linéaire à Nias, Indonésie 44

Fig 2.3 Groupement concentré l'habitat Pueblos an sud-ouest des Etats-Unis d'Amérique 45

Fig 2.4 Répartition des classes sociales dans la ville de Jaisalmer-Inde 47

Fig 2.5 Organisation sociale dans les villages du sud de Nias- Indonésie 48

Fig 2.6 Organisation spatiales de deux habitations de forme restreinte ((a) Famille monogame (Ferme Mofou au Cameroun), (b) Famille polygame (Ferme Moundang an Cameroun)) 49

Fig 2.7 Evolution et organisation spatiales d'une habitation de forme élargie regroupement plusieurs unités (habitat Houssa- nord du Nigeria) 49

Fig 2.8 Hiérarchisation des espaces extérieurs dans un tissu traditionnel 51

Fig 2.9 Hiérarchisation des espaces intérieurs d'une habitation traditionnelle 51

Fig 2.10 Echanges thermiques du corps humain 54

Fig 2.11 Diagramme bioclimatique de Givoni 57

Fig 2.12 Exemple de surfaces pour différentes orientations à partir du Nord 60

Fig 2.13 Classes d'orientations pour le climat méditerranéen en été 61

Fig 2.14	Azimut de la paroi verticale suivant l'orientation	61
Fig 2.15	Coefficients d'absorption pour différents matériaux et différentes couleurs	63
Fig 2.16	Eau et plantation complètent la conception de l'édifice	64
Fig 2.17	Répartition des déperditions thermiques dans une habitation	65
Fig 2.18	Classification des matériaux de stockage de l'énergie	68
	Chapitre 3 : Simulation numérique du comportement thermique des parois couplant Matériaux à Changement de Phase (MCP)	
Fig 3.1	Modèle physique pour l'étude du comportement thermique des parois	71
Fig 3.2	Organigramme de calcul	75
Fig 3.3	Validation du travail présent obtenu et la littérature	76
Fig 3.4	Flux de chaleur entrant de paroi en plâtre	78
Fig 3.5	Capacité thermique apparente de parois de plâtre avec différentes concentrations (Cas $CaCl_2.6H_2O$ avec 0%, 5%, 10% et 50%)	79
Fig 3.6	Comparaison des évolutions de la température intérieure pour des concentrations différentes (cas**:** eicosane)	81
Fig 3.7	Comparaison des évolutions de la température intérieure pour des concentrations différentes (cas**:** $Na_2CO_3.10H_2O$)	81
Fig 3.8	Comparaison des évolutions de la température intérieure pour des concentrations différentes (cas: $CaCl_2.6H_2O$)	82
Fig 3.9	Comparaison de la variation de la température intérieure pour trois parois de concentrations identique.	84
Fig 3.10	Coûts des MCP en fonction de la quantité	87

Fig 3.11	Structure du mur multicouche	89
Fig 3.12	Radiations globales pour un mur vertical pour quatre orientations durant un mois froid de l'année -Janvier- pour la ville de Ouargla.	92
Fig 3.13	Radiations global pour un mur vertical pour quatre orientations durant un mois chaud de l'année -Juillet- pour la ville de Ouargla	93
Fig 3.14	Effet de l'orientation sur la température intérieure d'un mur vertical (17 Juillet)	94
Fig 3.15	Effet de l'orientation sur la température intérieure d'un mur vertical:(a) sans MCPs, (b) avec MCPs (15%)	95
Fig 3.16	Effet de la concentration du MCP sur les besoins énergétiques pour un mur vertical pour quatre orientations	96
Fig 3.17	Gain de chaleur annuel pour un mur orienté Nord, Sud, Est, et Ouest à différentes concentrations du MCP	97
Fig 3.18	Coût du MCP et le coût total en fonction avec la concentration du MCP pour chaque orientation	99
	Chapitre 4: État de l'art de la démarche prospective énergétique et classification des modèles existants	
Fig 4.1	Méthode des scénarios selon Godet (1991)	108
Fig 4.2	Techniques de modélisatios de la consommation d'énergie dans le secteur résidentiel	111
Fig 4.3	Maison ÉcoTerra à Eastman	120
	Chapitre 5: Prospective de la demande énergétique à l'horizon 2040	
Fig 5.1	Organigramme du modèle d'estimation de la consommation d'énergie dans le secteur résidentiel	127
Fig 5.2	Plan du logement étudie et structure du mur extérieur	132

Fig 5.3	Localisation géographique des 48 stations météorologiques	133
Fig 5.4	Zonage climatique de l'Algérie selon les degrés jours de climatisation à base de 26°C	134
Fig 5.5	Zonage climatique de l'Algérie selon les degrés jours de chauffage à base de 18°C.	135
Fig 5.6	Zonage climatique final d'Algérie adapté aux besoins de la réglementation thermique dans le bâtiment	136
Fig 5.7	Localisation de communes algériennes sous Google Earth	137
Fig 5.8	Localisation géographique des 1540 communes sous Arcgis 9.3	138
Fig 5.9	Consommation d'énergie finale et coût par ménage et par zone	141
Fig 5.10	Répartition de la demande d'énergie finale par zone climatique	142
Fig 5.11	Croissance des logements	145
Fig 5.12	Schéma de base d'un système de réfrigération par absorption	148
Fig 5.13	Cycle frigorifique à absorption à simple effet	149
Fig 5.14	Cycle frigorifique à absorption à double effet opérant à trois niveaux de pression: haute, modérée et basse	150
Fig 5.15	Evolution de la demande énergétique dans le scénario tendanciel	151
Fig 5.16	Evolution de la demande d'énergie pour l'éclairage dans les différents scénarios	152
Fig 5.17	Demande d'énergie pour le refroidissement selon les deux scénarios	152
Fig 5.18	Schéma explicatif de la chaîne d'énergie pour les deux systèmes à absorption et à compression.	154

Fig 5.18	Economie en énergie primaire (gaz naturel) pour le refroidissement	157
	Chapitre 6: Méthodologie de la conception de bâtiment hybride et applications	
Fig 6.1	Bâtiment à énergie positive	157
Fig 6.2	Schéma de l'outil d'application	159
Fig 6.3	Plan de maison	160
Fig 6.4.	Structure du mur multicouche	161
Fig 6.5	Moyenne mensuelle de l'irradiation globale et de la vitesse du vent au cours des années (2000-2013)	166
Fig 6.6	Irradiation *solaire* globale et la *vitesse* du *vent* au cours d'un *jour* du mois de Mai sur le *site* de *Ouargla.*	167
Fig 6.7	Organigramme global de l'algorithme de dimensionnement	169
Fig 6.8	Profils d'énergie journalière consommée	174
Fig 6.9	Consommation annuelle d'électricité prélevée du réseau électrique	175
Fig 6.10	Energie mensuelle consommée et l'énergie produite mensuellement par le premier scénario	173
Fig 6.11	Energie mensuelle consommée et l'énergie produite mensuellement par le deuxième scénario	178
Fig 6.12	Energie horaire consommée durant un jour type du mois de Mai.	180
Fig 6.13	Coût du cycle de vie pour le premier scénario (avec tarifs d'électricité)	181
Fig 6.14	Coût du cycle de vie pour le deuxième scénario (avec tarifs d'électricité).	181

Liste des tableaux

	Chapitre 1: Contexte énergétique Mondial et Algérien	
Tab 1. 1	Potentiel solaire algérien en durée d'ensoleillement et en énergie reçue moyenne	14
Tab 1.2	Projet des BHE dans la wilaya de Eloued, Skikda et Laghouat	33
Tab 1.3	Caractéristiques de l'enveloppe de la maison à énergie positive de Fellbach	38
	Chapitre 2: Etat de l'art sur l'interaction climat et bâtiment	
Tab 2.1	Avantages et inconvénients comparés des différents changements d'état	67
	Chapitre 3 : Simulation numérique du comportement thermique des parois couplant Matériaux à Changement de Phase (MCP)	
Tab 3.1	Comparaison des valeurs de la température et écart entre des courbes obtenues par la simulation numérique et la littérature	77
Tab 3.2	Propriétés physiques des matériaux utilisés	80
Tab 3.3	Variation des températures maximales et minimales sur la surface intérieure en fonction de la concentration (Cas: Eicosane)	83
Tab 3.4	Variation des températures maximales et minimales sur la surface intérieure en fonction de la concentration (Cas: $Na_2CO_3 10H_2O$)	83
Tab 3.5	Variation des températures maximales et minimales sur la surface intérieure en fonction de la concentration (Cas: $CaCl_2.6H_2O$)	83
Tab 3.6	Comparaison entre la valeur maximale et la valeur minimale de la température de la surface intérieure pour chaque type de MCP (10% MCP).	85
Tab 3.7	Comparaison entre la valeur maximale et la valeur minimale de la température de la surface intérieure pour chaque type de MCP (15% MCP).	85
Tab 3.8	Comparaison entre la valeur maximale et la valeur minimale de la température	85

de la surface intérieure pour chaque type de MCP (50% MCP).

Tab 3.9 Prix des composés étudiés 86

Tab 3.10 Paramètres utilisés dans les calculs 88

Chapitre 4: État de l'art de la démarche prospective énergétique et classification des modèles existants

Tab 4.1 Avantages et limites des approches de modélisation bottom -up et top-down 114

Chapitre 5: Prospective de la demande énergétique à l'horizon 2040

Tab 5.1 Dépendance de la demande d'énergie avec les variables de conception 128

Tab 5.2 Caractéristiques thermiques du mur extérieur 131

Tab 5.3 Réseau des 48 stations synoptiques utilisées pour la réalisation des zonages climatologiques 132

Tab 5.4 Données énergétiques et géographiques pour les 48 stations 132

Tab 5.5 Taux d'équipement pour les appareils de climatisation 137

Tab 5.6 Caractéristiques des sept zones climatiques obtenues 138

Tab 5.7 Consommation d'énergie finale par ménage pour le chauffage et le refroidissement 139

Tab 5.8 Consommation d'énergie finale par ménage pour les appareils électroménagers 140

Tab 5.9 Taux d'accroissement annuel moyen de la population entre 1966 et 2013 143

Tab 5.10 Equipement des ménages algérien et carburant utilisé selon les deux scénarios. 146

Chapitre 6: Méthodologie de la conception de bâtiment hybride et applications

Tab 6.1	Puissance électrique de chaque appareil	163
Tab 6.2	Caractéristiques techniques des panneaux utilisés	164
Tab 6.3	Caractéristiques techniques de générateur d'éolienne	165
Tab 6.4	Coûts et la durée de vie des différents composants du système	173
Tab 6.5	Consommation d'énergie mensuelle des bâtiments, l'énergie produite mensuellement et les émissions de CO_2 évitées par le premier scénario	177
Tab 6.6	Consommation d'énergie mensuelle des bâtiments, l'énergie produite mensuellement et les émissions de CO_2 évitées par le deuxième scénario	179

Introduction Générale

L'énergie est un facteur déterminant de la qualité de la vie et de la prospérité d'une société. Elle est omniprésente dans tous les aspects de la vie et indispensable à plusieurs égards. La production, le transport et l'utilisation de l'énergie sont pour la majorité des pays des préoccupations constantes. Outre la sécurité énergétique, le monde fait face à de grands enjeux liés à l'énergie : la lutte contre les changements climatiques, la protection de l'environnement, l'incertitude concernant les prix de l'énergie, la satisfaction des besoins énergétiques des populations, la croissance et la compétitivité de l'économie ainsi que l'acceptabilité sociale des projets de mise en valeur des ressources énergétiques. Le défi est d'apporter des réponses à tous ces enjeux et l'efficacité énergétique se révèle le moyen le plus efficace de le relever en raison des nombreux avantages qu'elle procure. Ainsi, plusieurs autorités politiques, appuient leur politique énergétique sur l'efficacité énergétique (Québec, 2015).

Les bâtiments sont considérés comme un élément essentiel de la transition vers la durabilité nécessaire dans sa dimension d'énergie. Cela découle du fait que le secteur des bâtiments représente entre 30% à 40% de la demande d'énergie finale dans les pays les plus développés. Étant donné que dans les bâtiments, il y a une forte consommation d'électricité, ces chiffres se convertissent souvent à environ ou plus de 40% en énergie primaire et les émissions de CO_2 liées à l'énergie. Le Groupe d'Experts Intergouvernemental sur l'évolution du Climat (GIEC) indique que 30 % des émissions mondiales de gaz à effet de serre prévues dans le secteur de la construction peuvent être évitées, en 2030, avec un bénéfice économique net (Kapsalaki M, 2012).

Le secteur du bâtiment est l'un des secteurs dont la consommation a un impact significatif sur la consommation globale d'énergie du pays soit 43% de la consommation finale et 25% des émissions de CO_2 (ME, 2016). Il s'avère donc nécessaire de réduire l'impact environnemental de ce secteur en promouvant le concept des bâtiments à basse consommation d'énergie et ensuite la conception des bâtiments à énergie positive. L'intégration au bâtiment de sources d'énergies renouvelables constitue une solution respectueuse de l'environnement. Elles permettent d'acquérir une certaine autonomie énergétique et de réaliser des économies à moyen et long terme. Pour cela, nous proposons de développer une méthodologie de conception de bâtiments à récupération d'énergie multisources/multi-charges) capable de s'adapter à son environnement pour en extraire le maximum d'énergie et répondre à des applications diverses.

De ce fait, des démarches prospectives basées sur des modèles microéconomique et macroéconomique seront utilisés pour déterminer les besoins énergétiques dans le secteur résidentiel pour faire face aux défis énergétiques du futur.

L'objectif de ce travail est de développer une méthodologie pour réaliser des études de conception de bâtiments à énergie positive. La méthodologie consiste à déterminer des modèles architecturaux pour l'amélioration des performances énergétique et du confort thermique des bâtiments ainsi que la réduction des émissions de CO_2 dans l'environnement.

Globalement, la présente étude a pour but, l'élaboration d'un outil de calcul de la demande d'énergie à long terme dans le secteur résidentiel suivi d'un scénario de référence. Cette étude basée sur le Système d'Information Géographique (SIG), qui est un outil informatique permettant de représenter et d'analyser toutes les informations qui existent sur le territoire concerné ainsi que tous les événements qui s'y produisent. Il représente pour cette partie de l'étude l'outil idéal pour les décideurs une méthodologie pour la gestion du territoire. Grâce à cet outil, on peut modéliser le monde réel, classer et observer des phénomènes et prévoir les changements à venir.

La thèse est structurée en six chapitres:

Le premier chapitre présentera en premier lieu le contexte énergétique mondial et Algérien, en termes de ressources, de production, de consommation et aussi l'état des infrastructures régionales existantes, notamment des interconnexions électriques et gazières et leurs impacts sur l'environnement. Elle se focalise ensuite et particulièrement sur le secteur résidentiel.

Le deuxième chapitre traitera des repères conceptuels de l'habitat et le confort thermique dans les habitats ainsi que les différentes stratégies d'adaptation climatique des architectures.

Le troisième chapitre étudie le comportement thermique d'une paroi en plâtre contenant trois types différents de MCPs avec des concentrations variables pour mettre en évidence l'importance de la quantité et la qualité de MCP. Les objectifs préconisés dans ce chapitre est la détermination de la concentration optimale de l'isolation pour différentes orientations de mur sous les conditions climatiques de la ville de Ouargla.

Le quatrième chapitre vise :

- dans un premier temps à établir un aperçu sur les modèles de prospective énergétique existantes,
- dans un deuxième temps analyser les forces et les faiblesses de chaque modèle.

Le cinquième chapitre concernera une prévision de la consommation d'énergie dans le secteur résidentiel algérien, en se basant sur un modèle de prévision ascendant (microéconomique) en combinaison avec des données statistiques provenant de différents organismes. Les besoins en énergie pour 2040 sont estimés pour deux scénarios, à savoir un scénario de référence basé sur les tendances actuels, et un scénario volontariste, lequel apportant des modifications dans les modes de consommation en introduisant de nouvelles voies d'économie et d'efficacité énergétique dans le système d'éclairage et de climatisation.

Dans le sixième chapitre on présentera un modèle dynamique capable d'intégrer différentes sources d'énergie renouvelables (panneaux photovoltaïques et générateurs éoliens) pour convertir un bâtiment individuel consommateur d'énergie à un bâtiment à énergie positive, dans les conditions climatiques de la ville de Ouargla. Le modèle est utilisé pour optimiser un système hybride relié au réseau qui peut exploiter différentes sources d'énergie renouvelables.

Chapitre 1

Contexte énergétique Mondial et Algérien

1.1. Introduction

L'énergie depuis le commencement des âges a été le moteur de l'activité humaine, et c'est un élément qui intervient dans tous les actes quotidiens de l'homme. Les énergies jouent un rôle de catalyseur principal dans la génération du confort pour une nation et a un rôle significatif dans le développement des secteurs technologiques, industriels, économiques et sociaux (Parameshwaran R et al., 2012). La demande énergétique est tendanciellement en forte croissance. Sous l'effet de la croissance démographique et de la croissance économique. La population mondiale devrait passer de 7.3 milliards de personnes aujourd'hui à 9.1 milliards en 2040. Au cours de cette période, le PIB mondial aura plus que doublé et les pays non membres de l'Organisation de Coopération et de Développement Economiques (OCDE) enregistreront des taux de croissance particulièrement élevés. Cela signifie que le niveau de vie va augmenter partout dans le monde et que des milliards de personnes intégreront la classe moyenne. La croissance économique, associée à la croissance démographique, stimulera la demande énergétique mondiale qui augmentera d'environ 25 % d'ici 2040. Nous devrons exploiter toutes les sources d'énergie rentables pour satisfaire cette croissance considérable de la demande. Le pétrole et le gaz naturel représenteront probablement près de 60 % de l'offre mondiale en 2040, tandis que l'énergie nucléaire et les énergies renouvelables augmenteront d'environ 50 % pour constituer près de 25 % du mix énergétique mondial (Exxonmobil, 2017).

Nous effectuons dans ce chapitre un important travail de collecte et analyse des données énergétiques pour donner une image globale et assez générale de l'état actuel des systèmes énergétiques dans le monde, et en Algérie en particulier, en terme de ressource, de production, de consommation, et d'impacts sur l'environnement. Elle se focalise ensuite particulièrement sur le secteur résidentiel.

1.2. Principaux enjeux énergétiques à l'échelle de la planète

1.2.1. Ressources énergétiques mondiales

Les réserves prouvées mondiales en pétrole et en gaz se situent à hauteur respectivement de 51 et 53 fois la production mondiale de 2015, comparativement à 114 fois pour le charbon (CEA, 2016). La figure suivante représente l'évolution de la demande mondiale pour l'énergie primaire entre 1971-2015.

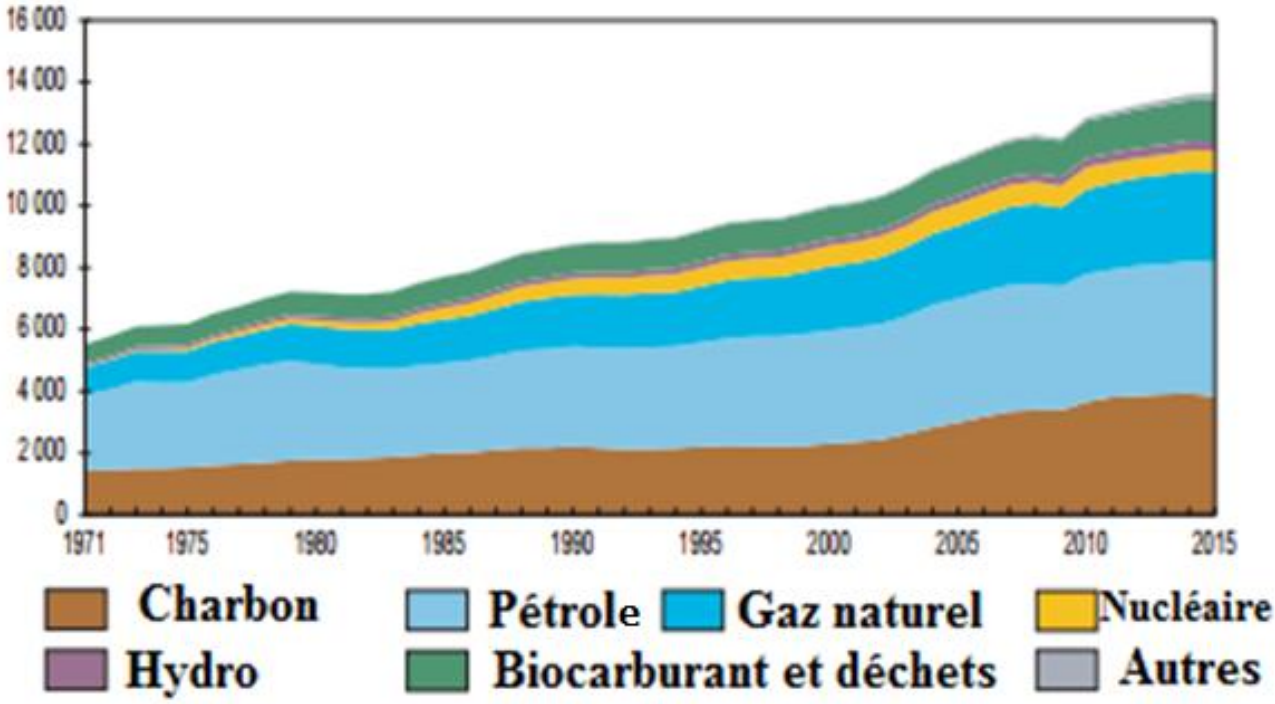


Figure 1. 1 : Evolution de la demande mondiale pour l'énergie primaire entre 1971-2015 par source (AIE, 2017).

La demande d'énergie mondiale a évolué de 6.101 Mtep en 1973 pour atteindre 13.647 Mtep en 2015. La consommation récente reflète le rôle toujours prépondérant des hydrocarbures dans le mix de la consommation énergétique primaire mondiale. La consommation reste fortement dominée par les énergies fossiles, celles-ci représentent en effet plus de 80% des sources d'énergies primaires. Le pétrole continue de représenter la première source d'énergie primaire avec une part de 31.7 %, suivi du charbon avec une part de 28.1% et du gaz naturel avec une part de 21.6% (figure 1.2).

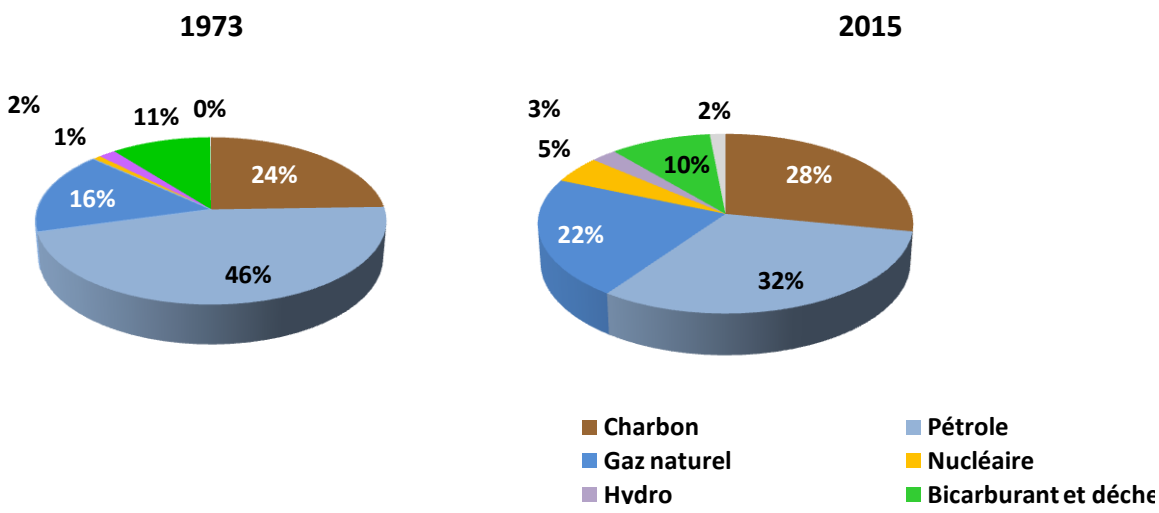


Figure 1.2: Contribution de chaque source dans la demande mondiale en énergie primaire pour 1973 et 2015.

On outre, on remarque une diminution de la contribution du pétrole sur la période 1973-2015, elle est cependant compensée par une augmentation de l'utilisation du gaz et du charbon (figure 1.2) (AIE, 2017). Le recours au gaz est principalement dû à sa nature plus propre et sa souplesse d'utilisation dans la production d'électricité ainsi qu'à son abondance. L'augmentation de la part du charbon reflète la croissance importante des besoins en énergie des économies de la Chine, de l'Inde et d'autres pays en développement sur cette période.

Les ressources fossiles sont géographiquement concentrées dans un nombre limité de région, dont certains sont marqués par des conflits géopolitiques. Evidemment cela peut compromettre la sécurité des approvisionnements, ainsi que la stabilité des prix (Amara A, 2016).

1.2.2. Demande énergétique mondiale

L'énergie est un enjeu vital au niveau mondial. Inégalement répartie et inégalement consommée, on peut s'interroger sur l'avenir de la demande énergétique au niveau mondial.

L'évolution des besoins mondiaux en énergie primaire a connue une croissance de 1.8 %/an en moyenne ces dernières années (1992-2016) dont la forte croissance au Moyen-Orient (4.5 %) et dans les pays en développement (3.7 % par an en Inde et 4.7 % en Chine) mais une stabilisation dans l'Union européenne sur la même période (CEA, 2016; BP, 2017). Selon le

scénario développé par l'Agence Internationale de L'énergie, il y aura une augmentation de 30 % de la demande énergétique mondiale en 2040 (AIE, 2016).

1.2.3. Consommation énergétique mondiale

La consommation d'énergie finale a une influence directe sur le développement économique et environnemental. Elle peut être largement classée en catégories comme représenté dans la figure 1.3.

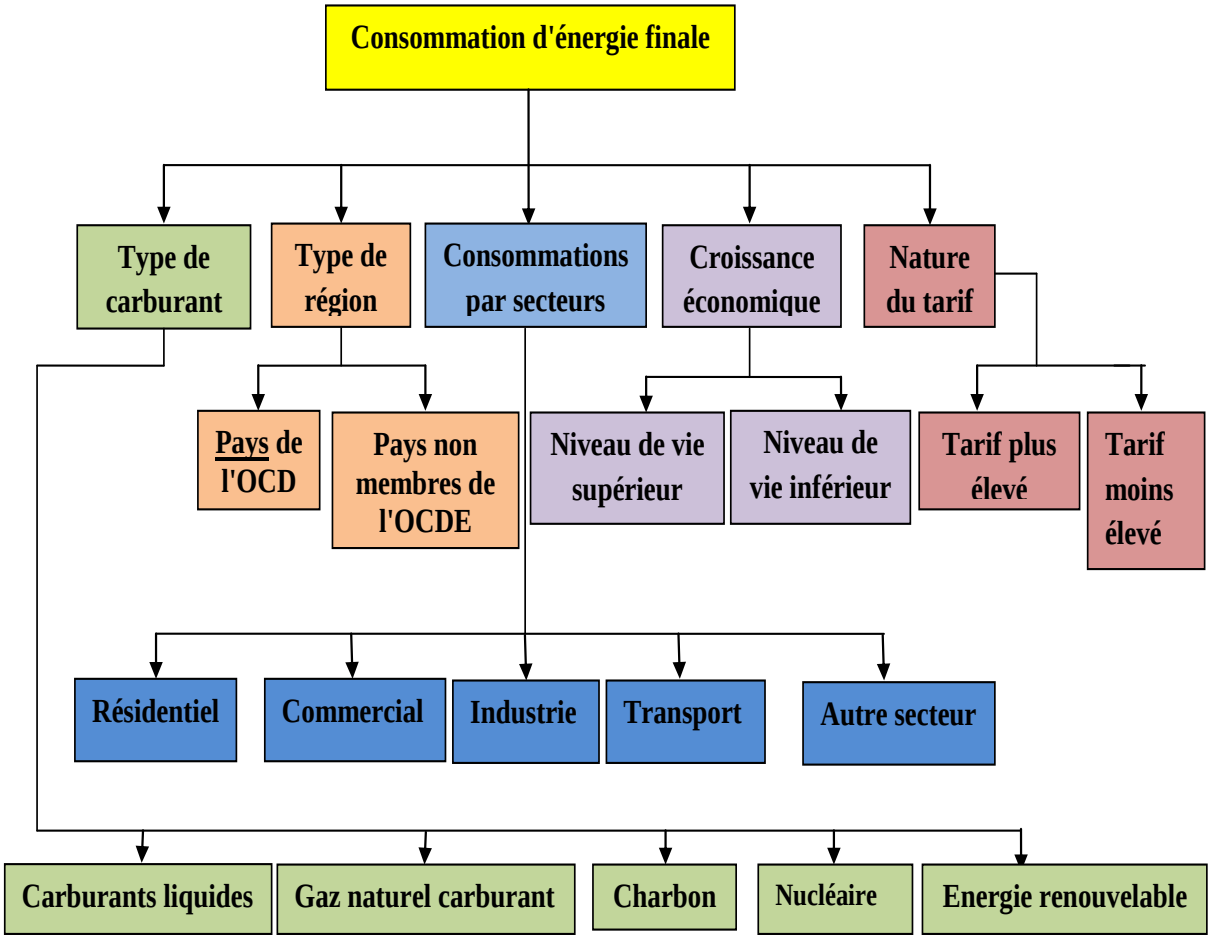


Figure 1.3: Consommation énergétique globale (Parameshwaran R et al, 2012).

Depuis la révolution industrielle, la consommation d'énergie n'a cessé d'augmenter. Elle a progressé de 101.33 % en 42 ans, de 1973 à 2015 (consommation finale). Selon l'Agence internationale de l'énergie, la consommation énergétique mondiale finale s'est établie à 9.384 Mtep en 2016 (4.661 Mtep en 1973) (AIE, 2017). La répartition par secteur de l'énergie finale est : 29 % pour l'industrie, 28 % pour les transports, et 34 % pour le résidentiel, l'activité tertiaire et l'agriculture. Les 9 % restants concernent les usages non énergétiques (figure 1.4) (AIE, 2016).

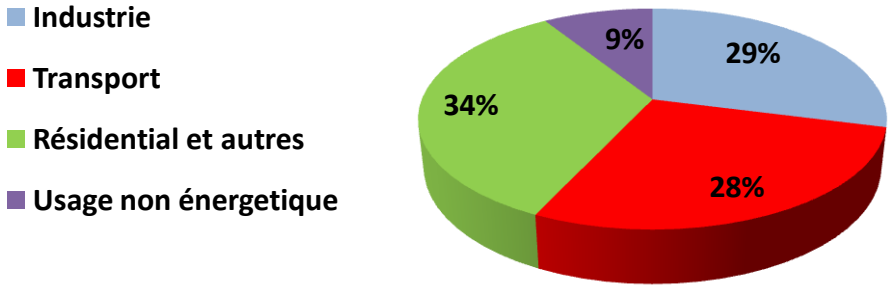


Figure 1.4: Consommation finale d'énergie mondiale par secteur en 2014 (AIE, 2016).

La part des énergies dans les besoins finaux en 2015 : domination toujours très forte des combustibles fossiles dans la consommation finale d'énergie (67.1 % dont 41 % pour le pétrole). Le gaz naturel et l'électricité à hauteur respectivement de 14.9 et 18.5 % devancent la biomasse (11.2 %) et le charbon (11.1 %) (AIE, 2017). D'ici 2030, l'AIE retient dans son scénario 2015 une situation semblable, excepté pour l'électricité qui passerait à 22 % au détriment du pétrole, et de la biomasse. Cette hausse de la part de l'électricité qui est déjà visible dans les pays industrialisés, (France, où elle est passée de 9.9 à 24.9 % entre 1973 et 2015) est attendue dans de nombreux pays en développement.

La consommation d'électricité par habitant montre de fortes disparités dans le monde, entre 568 kWh/an pour toute l'Afrique, 3 938 kWh/ an en Chine et 12 961 kWh/an aux Etats-Unis. Cette situation montre l'ampleur des besoins en nouvelles capacités de production d'électricité. D'après l'Agence internationale de l'énergie (AIE), d'ici 2030, la production d'électricité pourrait progresser de 2 % par an dans le monde à comparer avec 1.4 % pour la demande finale totale d'énergie (AIE, 2016).

La part des énergies dans la production mondiale d'électricité: le charbon domine avec 41 % de la production ; il est suivi par le gaz naturel, l'hydraulique et le nucléaire avec respectivement 21.6 %, 16.4 % et 10.7 %. Dans l'Union européenne, le nucléaire devance désormais de peu le charbon (respectivement 27.7 % et 26.6 %), excepté en France où il est largement dominant (78 %). Le scénario 2014 de l'AIE retient à partir de 2020 un maintien de la part du nucléaire dans la production mondiale à 12 % malgré une croissance en valeur absolue (CEA, 2016).

Les énergies renouvelables dans la production électrique : hors hydraulique, a une faible part dans le total des capacités installées mais avec une croissance rapide et désormais occupent une position notable en valeurs absolues. Ainsi, les capacités photovoltaïques qui augmentent rapidement atteignent 2427 GW crête en 2015, il en est de même pour les capacités éoliennes qui atteignent 433 GW (CEA, 2016). L'hydraulique a produit 16 % de l'électricité mondiale en 2015, les autres énergies renouvelables 6.3 % (BP, 2017).

1.2.4. Consommation d'énergie dans le secteur résidentiel

Le secteur du bâtiment est le plus grand consommateur d'énergie au monde et qui représente plus d'un tiers de la consommation d'énergie finale (34% de la consommation d'énergie finale) et la moitié de l'électricité mondiale consommée. En conséquence, il est responsable d'environ un tiers des émissions mondiales de carbone. La consommation énergétique dans le secteur du bâtiment devrait augmenter fortement dans les années prochaines suite à l'augmentation attendue de la population de 2.5 milliards de personnes d'ici 2050, et de l'amélioration du niveau de vie, exerçant une pression supplémentaire sur le système énergétique. Réaliser des économies d'énergie et réduire les émissions dans le secteur du bâtiment est un défi politique ambitieux mais possible (Outlook for Energy, 2017). Les meilleures techniques de construction disponibles à énergies renouvelables dans les bâtiments avancés, tels que les bâtiments à énergie positive.

1.3. Impact environnemental

La lutte contre le réchauffement climatique est un des plus importants défis actuels auxquels doit se confronter l'humanité. Les conséquences du réchauffement climatique sont multiples, importants et de plus en plus fréquents. On pourra citer entre autres que l'on peut s'attendre à une fonte des glaces aux pôles, à des phénomènes naturels extrêmes plus fréquents, à une mise en péril d'espèces animales et florales, etc. La cause principale de ce dérèglement climatique est, et de manière générale: la perturbation des écosystèmes, l'exploitation des ressources naturelles et très probablement l'activité humaine.

Les activités humaines sont les principales responsables des changements climatiques actuels et de leurs impacts sur l'environnement. En effet, selon le Groupe d'Experts Intergouvernemental sur l'évolution du Climat (GIEC), le réchauffement climatique est bien réel et l'activité humaine en est responsable de par l'émission de GES. Par ailleurs, au cours du siècle

dernier, un réchauffement moyen de la température à la surface de la terre de 0.74 °C a été observé, alors qu'il était prévu que la température moyenne n'augmenterait que de 0.6 °C. Les prévisions pour 2100 sont encore plus alarmantes, avec une augmentation prévue de la température moyenne de 2 à 4.5 °C (en l'absence de politiques) (figure 1.5) (Chenailler H, 2012) (Recioui B et al., 2016).

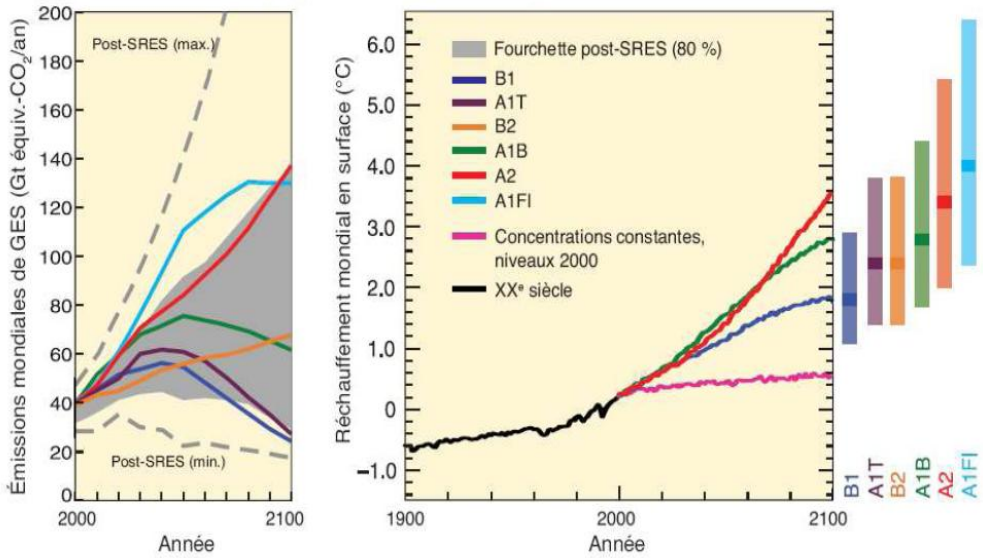


Figure 1.5 : Scénarios d'émissions de GES pour la période 2000-2100 (en l'absence de politiques (Chenailler H, 2012) (Cañete M. A, 2015).

Au niveau mondial, les émissions de dioxyde de carbone (CO_2) dues à la production d'énergie en 2015 sont estimées par l'AIE à 32 294 Mt, en progression de 108.91 % depuis 1973, dont 44.9 % produites par le charbon, 34.9 % par le pétrole et 19.7 % par le gaz naturel (AIE, 2017); par secteur, 37 % pour de l'industrie, 23 % des transports, 32 % des logements , des services et de l'agriculture. D'après l'AIE, les émissions de CO_2 par habitant en 2014 sont estimées à 4.47 tonnes dans le monde, 16.22 tonnes aux États-Unis, 8.93 tonnes en Allemagne, 4.32 tonnes en France, 6.66 tonnes en Chine, 1.56 tonne en Inde et 0.96 tonnes en Afrique (AIE, 2015).

Dans le cadre des négociations internationales sur le climat, tous les pays se sont engagés à maintenir la hausse des températures de 2 °C par rapport à l'ère préindustrielle. Pour aboutir à ce résultat, il faut globalement s'abstenir d'extraire un tiers des réserves de pétrole, la moitié des réserves de gaz et plus de 80 % du charbon disponibles dans le sous-sol mondial, d'ici à 2050.

Selon l'AIE, les engagements individuels des pays à la COP21 sont largement insuffisants : ils ne feraient que ralentir la progression des émissions de CO_2 et mèneraient à une hausse des températures de +2.7 °C en 2100 (AIE, 2016).

1.4. Contexte énergétique en Algérie

Le secteur de l`énergie joue un rôle primordial dans le développement économique et social du pays : Il a pour mission d`assurer la couverture des besoins énergétiques nationaux à long terme et le financement du développement économique grâce aux recettes des exportations de ces sources énergies. Actuellement, les ressources exploitées sont essentiellement d'origine fossile. Il s'agit surtout d'hydrocarbures et, dans une certaine mesure, du charbon. Les énergies renouvelables constituent une importante source énergétique, du fait de la situation géographique du pays. Toutefois, cette source n'est pas encore exploitée commercialement, et son utilisation se limite à certaines zones géographiques isolées.

En 2016, l'Algérie possédait environ 0.7 % des réserves en pétrole et 2.4 % en gaz (BP, 2017). Selon le bilan annuel du ministère de l'Energie et des Mines algérien, plus de 99% du mix énergétique est constitué de produits pétroliers et de gaz. La production commerciale d'énergie primaire a atteint 154.9 Mtep en 2015 (ME, 2016). Selon la figure ci-après, la structure de la production d'énergie primaire de 2015 reste dominée par le gaz naturel à hauteur de 52% (figure1.6).

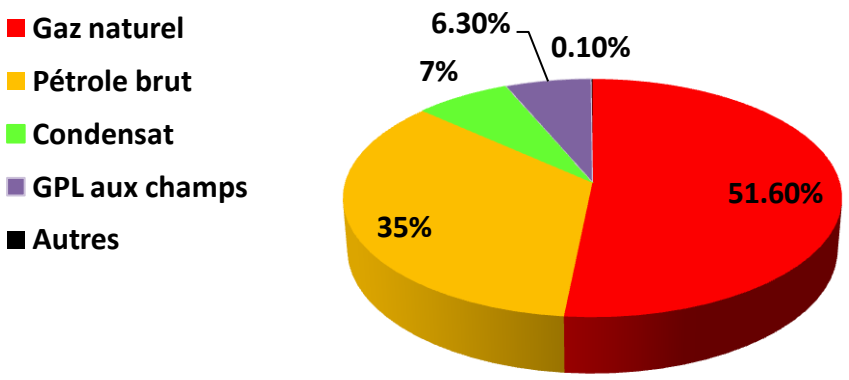


Figure 1.6. Structure de la production d'énergie primaire (ME, 2016).

Le secteur énergétique en Algérie occupe une place prédominante dans l'économie de l'Algérie : les hydrocarbures à eux seuls représentent 30 % du PIB, 60 % des recettes du budget et 95 % des recettes d'exportation. L'Algérie est en 2015 le 18e producteur de pétrole, le 10e producteur de gaz naturel et le 6e exportateur de gaz naturel au monde. La production et la consommation d'énergie, y compris dans le secteur de l'électricité, sont tirées des hydrocarbures à plus de 99 % (CEA, 2016). Elle voit fondre ces ressources avec la baisse du prix du baril depuis 2014. Le développement de la production des gaz de schiste aux États-Unis a réduit l'un des principaux débouchés d'exportation du pays. l'État algérien a commencé à envisager des solutions en taillant dans les multiples subventions à la consommation, ce qui à entraine une hausse généralisée des prix des produits de première nécessité ainsi que de ceux du gaz, de l'électricité et des carburants (Les Échos, 2015). En 2012, l'État algérien commence à envisager des solutions écologiques en investissant dans les énergies nouvelles et renouvelables. Selon le Programme algérien de développement des énergies renouvelables et d'efficacité énergétique (PENREE) de 2012, l'Algérie vise une puissance installée d'origine renouvelable de 22 000 MW d'ici 2030. Mais trois ans après ce plan, les réalisations se font toujours attendre : le rapport annuel du Global Wind Energy Council sur l'éolien ne mentionne même pas l'Algérie, et celui de l'Agence internationale de l'énergie sur le solaire annonce seulement que l'Algérie a installé 300 MW (AIE, 2016).

Les réserves d'hydrocarbures non conventionnels (gaz de schiste) sont estimées pour leur part à 700 trillions de m^{3} ce qui correspond à quatre fois le niveau des réserves gazières actuelles et représentant ainsi la troisième réserve la plus importante au monde (Gouareh A, 2017).

La consommation totale d'énergie primaire en Algérie atteignait 51.67 Mtep en 2014, soit 1.33 tep par habitant, 30 % au-dessous de la moyenne mondiale : 1.89 tep, mais deux fois plus élevée que la moyenne africaine : 0.67 tep (France : 3.67 ; Maroc : 0.56) (AIE, 2016).

1.5. Réserves, production et consommation

1.5.1. Pétrole

Les réserves prouvées de pétrole de l'Algérie étaient estimées par BP à 1.5 milliards de tonnes en 2016 (12.2 milliards de barils), soit 22 années de production au rythme de 2016. Ces réserves classaient l'Algérie au 17e rang mondial avec 0.7 % du total mondial, et au 4e rang en Afrique derrière la Libye, le Nigeria et l'Angola (BP, 2017).

En 2016, l'Algérie a produit 68,5 Mt de pétrole, soit 1.59 Mb/j. Elle se classe au 18e rang mondial avec 1.6 % de la production mondiale et au 3e rang en Afrique derrière le Nigeria (2.6 %) et l'Angola (2,0 %) (BP, 2017).

En 2016, l'Algérie a consommé 19.3 Mt de pétrole. Elle représente 0.4 % de la consommation mondiale. Sa consommation n'absorbe que 26.6 % de sa production**.**

L'Algérie était en 2014 au 11e rang mondial des pays exportateurs de pétrole, avec 29 713 ktep (AIE, 2016).

1.5.2. Gaz naturel

Les réserves prouvées de gaz naturel de l'Algérie étaient estimées par BP à 4 500 milliards de m³ en 2016. Ces réserves classaient l'Algérie au 10e rang mondial avec 2.4 % du total mondial, et au 2e rang en Afrique derrière le Nigeria (BP, 2016).

En 2016, l'Algérie a produit 83milliards de m³ de gaz naturel. Elle se classe au 9e rang mondial avec 2.3 % de la production mondiale et au 1er rang en Afrique (BP, 2017).

En 2015, l'Algérie a consommé 39 milliards de m³ de gaz naturel, soit 35.1 Mtep. Elle se classe au 27e rang mondial avec 1,1 % de la consommation mondiale. Sa consommation absorbe 47 % de sa production (BP, 2017).

En 2015, les exportations de gaz naturel de l'Algérie par gazoduc ont atteint 25 Mds m³, destinées surtout à l'Espagne : 12 Mds m³ à l'Italie : 6.6 Mds m³. Ses exportations par voie maritime sous forme de GNL ont atteint 16.2 Mds m³, destinées surtout à la France : 4.3 Mds m³, à la Turquie : 3.8 Mds m³ et à l'Espagne : 3.7 Mds m³ (BP, 2017).

1.5.3. Gaz de schiste

L'Algérie va se lancer dans l'exploitation du gaz de schiste, bien que beaucoup d'algériens s'opposent à cette exploitation. L'évaluation de Sonatrach du potentiel de gaz de schiste a été achevée, il a été évalué à près de 17 000 milliards de m^{3}, quatre fois plus que ses réserves de gaz conventionnel (Guemache H, 2012). Selon le groupe pétrolier Sonatrach le lancement de la production de gaz de schiste est prévu en 2020 et que la capacité de production serait de 30 milliards de m^{3} par an dès les premiers forages.

1.5.4. Energies renouvelables

Les énergies renouvelables sont issues du soleil, du vent, de la chaleur de la terre, de l'eau ou encore de la biomasse. A la différence des énergies fossiles, les énergies renouvelables sont des ressources illimitées. Elles regroupent un certain nombre de filières technologiques selon la source d'énergie valorisé et l'énergie utile obtenue. L'Algérie, un pays très vaste d'un climat très diversifié, ayant deux grandes zones géographiques distinctes, le Nord méditerranéen et le Sud saharien, peut devenir un bon concurrent dans cette course aux énergies renouvelables. En effet, concernant l'énergie solaire, l'Algérie bénéficie de quelque 3000 heures en moyenne d'ensoleillement par an, autant dire que la source est abondante (Rahmouni S et al, 2016).

a. Ressources solaires

L'Algérie est parmi les pays les mieux dotés en ressources solaires au monde, soit 169.000 TWh/an pour le solaire thermique, 13.9 TWh/an pour le solaire photovoltaïque. Le potentiel solaire algérien est l'équivalent de 10 grands gisements de gaz naturel qui auraient été découverts à Hassi R'Mel. La répartition du potentiel solaire par région climatique au Niveau du territoire algérien est représentée dans le tableau 1.1.

Tableau 1. 1: Potentiel solaire algérien en durée d'ensoleillement et en énergie reçue moyenne (Recioui Bakhta, 2017).

régions	Régions côtières	Hauts plateaux	Sahara
Superficie	4%	10%	86%
Durée moyenne d'ensoleillement (Heures/an)	2650	3000	3500
Energie moyenne reçue ($Kwh/m^2/an$)	1700	1900	2650

La durée d'ensoleillement au Sahara algérien est de l'ordre de 3500 heures, ce potentiel peut constituer un facteur important de développement durable dans cette région, s'il est exploité de manière économique. La durée d'ensoleillement sur la quasi-totalité du territoire national dépasse les 2000 heures annuellement et atteint les 3900 heures (hauts plateaux et Sahara). L'énergie reçue quotidiennement sur une surface horizontale de 1 m^2 est de l'ordre de 5 KWh sur la majeure partie du territoire national, soit près de 1700 $kWh/m^2/an$ au Nord et 2263 $KWh/m^2/an$ au sud du pays (Recioui Bakhta, 2017). La figure suivante représente une

cartographie d'irradiations solaires reçues sur un plan horizontal en kWh/m^2. an développée sous logiciel Arc-gis 9.3 :

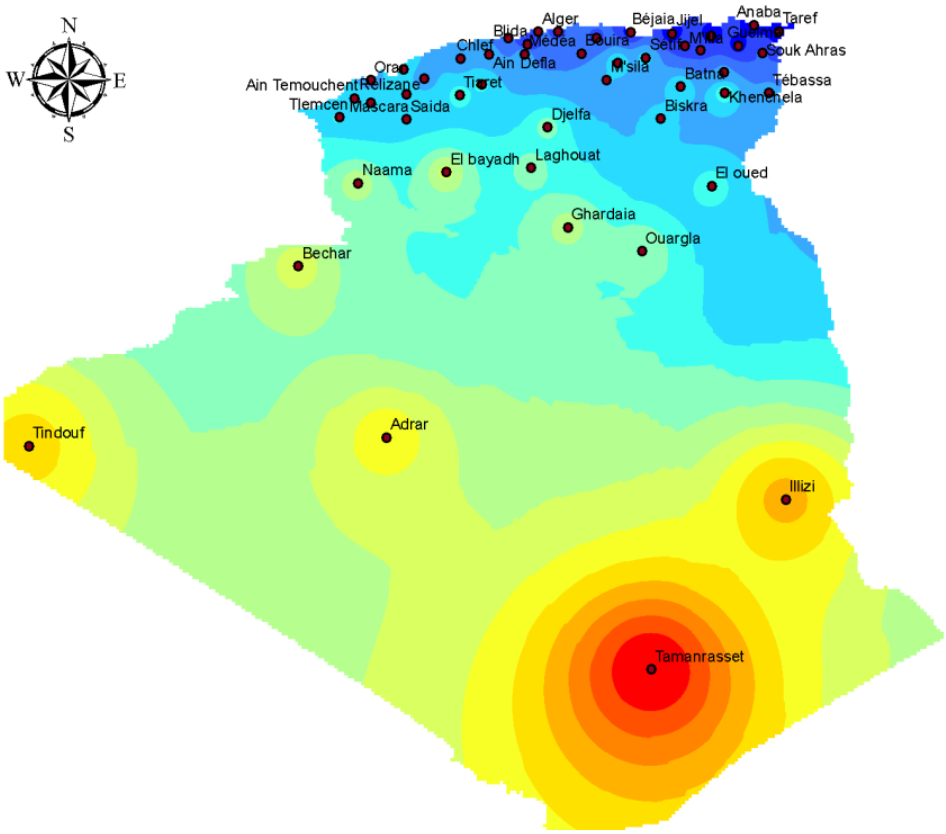


Figure 1. 7: Carte d'irradiations solaires reçues sur un plan horizontal en kWh/m^2 an développée sous Arc GIS 9.3 (Gouareh A, 2017).

b. Ressources éoliennes

La ressource éolienne en Algérie varie beaucoup d'un endroit à un autre. Ceci est principalement dû à une topographie et un climat très diversifiés. En effet, l'Algérie, se subdivise en deux grandes zones géographiques distinctes. Le Nord méditerrané en est caractérisé par un littoral de 1200 Km et un relief montagneux, représenté par les deux chaines de l'Atlas tellien et l'Atlas saharien. Entre elles, s'intercalent des plaines et les hauts plateaux de climat continental. Le Sud, quant à lui, se caractérise par un climat saharien. La figure 1.8 montre que le Sud est caractérisé par des vitesses du vent plus élevées que le Nord, plus particulièrement dans le Sud-ouest, avec des vitesses supérieures à 4 m/s et qui dépassent la valeur de 6 m/s dans la région d'Adrar. Concernant le Nord, on remarque globalement que la vitesse moyenne est peu élevée. La première expérience en énergie renouvelable utilisé pour le pompage d'eau avec une éolienne en Afrique a été effectué a Adrar l'an 1957 au ksar Sidi Aissa, pour l'irrigation de 50Hec, ce

système éolien a été saboté en 1962 à la sortie des français de l'Algérie, L'Algérie à un régime de vent modéré (2 à 9 m/s, selon la carte des vents. Ce potentiel énergétique convient parfaitement pour le pompage de l'eau particulièrement sur les Hauts Plateaux et la Sahara .Le potentiel énergétique est énorme sachant que les régions du sud de l'Algérie se trouvent dans un couloir de vent de 6 m/s (Bentouba S, 2010).

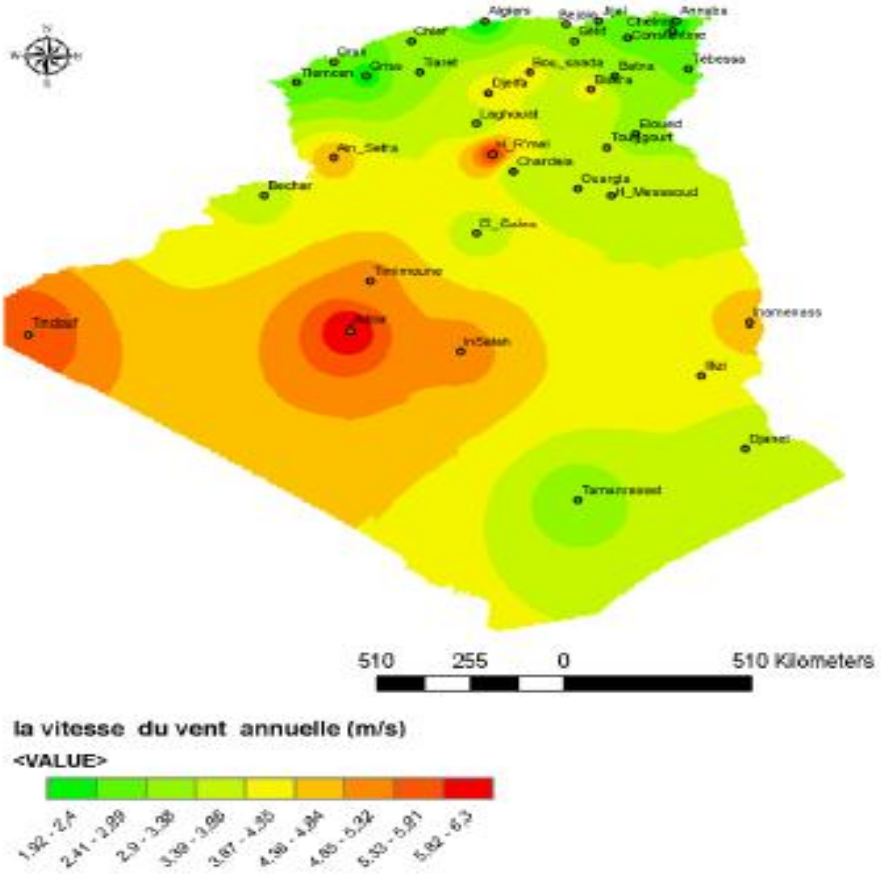


Figure 1.8. Carte de la vitesse du vent en m/s développée sous Arc GIS 9.3 (Gouareh A, 2017).

c. Ressources géothermiques

L'Algérie dispose d'un potentiel géothermique important, estimé en termes de production d'électricité à 700 MW. Plus de 200 sources chaudes ont été identifiées au nord du pays dont un tiers de ces sources à des températures supérieures à 45 °C et un débit de plus de 2 m^3/s à la sortie du réservoir. Certaines sources présentent des températures pouvant atteindre 96 °C à Hamman Meskoutine. Plus au sud, le pays recèle un vaste réservoir géothermique qui s'étend sur plusieurs milliers de km^2. Ce réservoir est appelé "nappe albienne" et présente une température moyenne de 57°C (CEA-AN, 2012). Malgré la disponibilité d'un potentiel géothermique important, les ressources existantes sont employées seulement pour le

chauffage des locaux comme le cas à Hammam Maskhoutine, Touggourt et Ghardaia. Un système de chauffage résidentiel, alimenté par l'eau géothermique à 69 °C, est également prévu pour Hammam Righa (Gouareh A, 2017).

La figure suivante représente une cartographie de la distribution du gradient géothermique dans le territoire national élaboré sous logiciel Arc GIS 9.3.

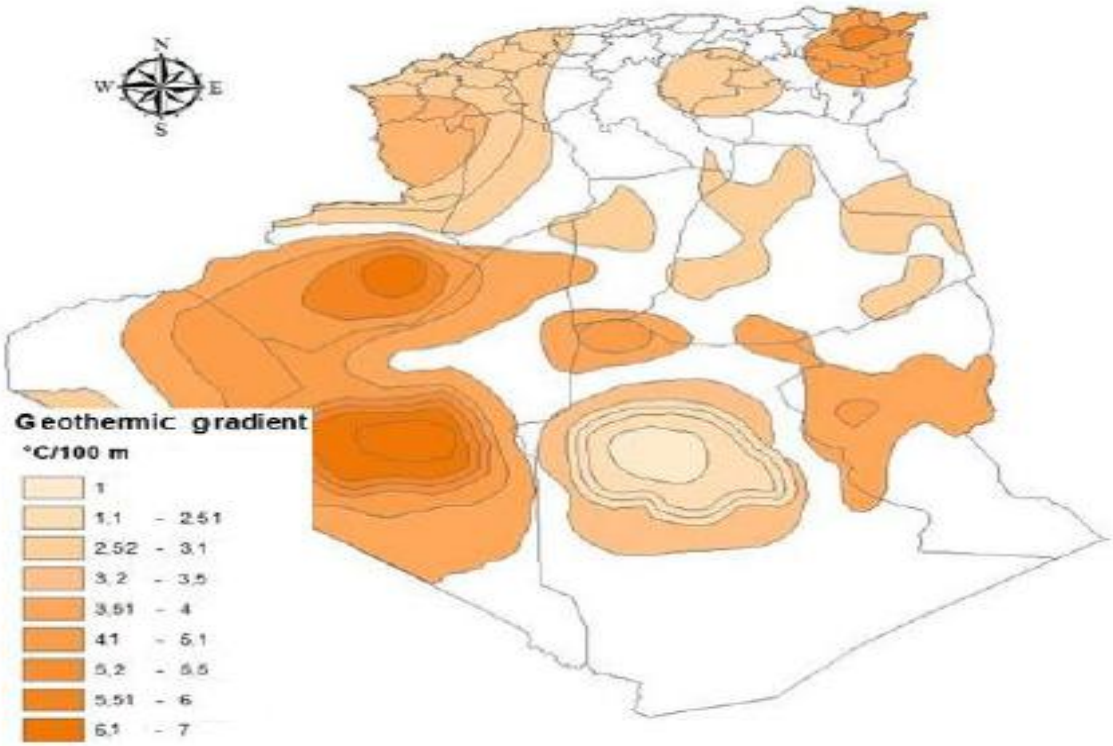


Figure 1. 9 : Carte des ressources géothermiques (Gouareh A et al, 2015).

d. Ressource en biomasse

La part de la biomasse dans les bilans énergétiques de l'Algérie est négligeable. La valorisation des déchets organiques et principalement des déjections animales pour la production du biogaz pourrait être considérée comme une solution économique, décentralisée et écologique avec une autonomie énergétique qui permettra un développement durable des zones rurales avec une quantité d'animal de plus de 25 millions de différents têtes. Les zones forestières couvrent environ 250 millions d'hectares, soit moins de 10% de la surface totale du pays. Théoriquement, le potentiel total de la biomasse est estimé à 37 Mtep dont environ 10% pourraient être récupérés. 5 millions de tonnes de déchets urbains et agricoles sont produits annuellement. Le potentiel théorique d'énergie avoisine les 1.33 millions tep/an (CEA-AN, 2012).

1.6. Technologies de conversions

1.6.1. Photovoltaïque (PV)

Le module photovoltaïque transforme l'énergie solaire en énergie électrique (courant continu). Il joue donc le rôle de générateur dans le système photovoltaïque. Un onduleur permet de convertir le courant continu produit par les panneaux photovoltaïques en courant alternatif identique à celui du réseau électrique. L'énergie produite par un module photovoltaïque dépend du niveau de l'énergie solaire. Ainsi, durant la journée, l'énergie produite va varier en fonction de la variation de l'énergie solaire. Une cellule photovoltaïque peut être réalisée avec de nombreux semi-conducteurs. Il existe aujourd'hui trois principales technologies : le silicium cristallin, les couches minces et les cellules organiques. Ces technologies coexistent sur le marché dans des proportions équivalentes depuis de nombreuses années malgré des prix et des rendements très différents. L'augmentation des rendements focalise particulièrement l'intérêt des chercheurs (Dahouénon M. A, 2011).

1.6.1.1. Silicium cristallin

Le silicium représente aujourd'hui l'essentiel de la production mondiale de panneaux photovoltaïques. Il s'agit d'un matériau extrêmement abondant, le stable et il est non toxique. Cette filière est elle-même subdivisée en plusieurs technologies distinctes de part la nature du silicium employé et/ou sa méthode de fabrication. Cette filière comporte deux technologies (Bailly L, 2010): le silicium monocristallin et le silicium multicristallin (Vighetti S, 2010).

-Le silicium mono cristallin est difficile à obtenir. En effet, il nécessite un taux de pureté très élevé et donc plusieurs étapes de purification. Ces étapes sont délicates et donc coûteuses. Le rendement du silicium monocristallin est le plus élevé, il est compris entre 12 et 20% pour les cellules industrielles. Son coût élevé est aujourd'hui un handicap et le silicium monocristallin perd du terrain devant le silicium multicristallin.

-Le silicium multicristallin est devenu aujourd'hui la technologie la plus utilisée. A elle seule elle représente près de 50% du marché. Ces cellules sont obtenus par coulage de cristaux de silicium ce qui rend sa structure hétérogène. Son rendement est légèrement inférieur au silicium monocristallin il est compris entre 10 et 14% selon les fabricants. En revanche sa fabrication est beaucoup plus simple, les coûts de production sont donc plus faibles. L'un des points faibles de ces deux technologies est la quantité de matière utilisée, même si actuellement la taille des lingots et des cellules augmentent continuellement (Bailly L, 2010).

1.6.1.2. Couches minces

Les couches minces font appel à des procédés de fabrication (dépôt sur ruban) visant la diminution de l'épaisseur des cellules. La technologie à couche mince dont la plus mure est le silicium amorphe (Sia) représentait en 2008 plus de 7% du marché mondial. L'avantage de cette technique est l'utilisation de substrats à bas coût. Le silicium est déposé à basse température sur un substrat en verre. De plus il est possible de déposer ces cellules sur des substrats souples et ainsi de fabriquer des cellules souples. Son prix est plus faible que les cellules cristallines ; en revanche, le rendement d'une cellule en Sia est inférieur à celui des cellules cristallines, il est d'environ 7%. L'utilisation de ce type de cellules nécessite l'utilisation d'une isolation galvanique entre les modules et le réseau. Sans cette isolation galvanique les cellules amorphes se dégradent très rapidement. La raison physique de ce phénomène reste encore obscure. Les cellules amorphes captent très bien le rayonnement diffus et sont donc moins sensibles aux variations de rayonnement direct. Ces cellules sont donc une très bonne alternative aux cellules cristallines sur des sites soumis à des ombrages sévères (Bailly L, 2010).

D'autres matériaux sont également utilisés dans les filières à couches minces comme le Tellure de Cadmium (CdTe), le diséléniure de cuivre et d'indium (CIS) et de gallium (CIGS). Ces technologies possèdent de bons rendements, pouvant aller jusqu'à 19%. Malgré les potentialités de ces trois technologies, les problèmes de toxicité sur l'environnement et d'approvisionnement en matières premières qu'elles soulèvent les cloisonneront au laboratoire ou à des applications très spécifiques.

1.6.1.3. Cellules organiques

Les cellules organiques comprennent deux voies : la voie des cellules « humides » et la voie des cellules polymères organiques dites aussi cellules« plastiques ». Les progrès de ces technologies sont très rapides, des records de rendement sont très fréquemment battus (actuellement près de 6%). Le principal frein à ces technologies est actuellement la stabilité de leurs performances ainsi que leur durée de vie (actuellement environ1000 heures). Les nanosciences ouvrent cependant de nouvelles voies à leurs améliorations. Leur avenir industriel n'est pas encore établi mais ces technologies ouvriraient la voie à des modules à très bas coût, biodégradable et pouvant être intégrés à toutes formes de surface. Par exemple des encres photovoltaïques sont actuellement étudiées. Ces encres pourraient être intégrées à un très large éventail de matériaux (Gouareh A, 2017).

1.6.2. Eolien

Une éolienne est une machine qui transforme l'énergie cinétique du vent (déplacement d'une masse d'air) en énergie mécanique ou électrique. Le principe de fonctionnement d'une éolienne est relativement simple: le vent fait tourner des pales (généralement trois) qui font elles-mêmes tourner le générateur situé dans la nacelle.

(a) (b)

Figure 1. 10: Technologies d'éoliennes, (a) à axe horizontal et (b) à axe vertical (Gouareh A, 2017).

Ce générateur transforme l'énergie mécanique du vent en énergie électrique. L'avantage de cette technologie est qu'elle est déjà compétitive en comparaison aux technologies conventionnelles. Les inconvénients étant son intermittence et le fait qu'elle n'offre pas de possibilités de stockage à un coût intéressant. Il existe deux grandes catégories d'éoliennes selon la disposition géométrique de l'arbre sur lequel est montée l'hélice: des turbines éoliennes à axe horizontal et des turbines éoliennes à axe vertical (figure 1.10) (Gouareh A. 2017).

1.7. Systèmes hybride

Un système hybride des sources d'énergie renouvelables est un système électrique, comprenant plus d'une source d'énergie, parmi lesquelles une au moins est renouvelable. Le système hybride peut comprendre un dispositif de stockage.

1.7.1. Classification

Plusieurs classifications de systèmes hybrides sont réalisées selon le critère choisi.

1.7.1.1. Régime du fonctionnement

Les systèmes hybrides peuvent être divisés en deux groupes. Dans le premier groupe, on trouve les systèmes hybrides, travaillant en parallèle avec le réseau électrique, appelés aussi connectes réseau. Ces systèmes contribuent à satisfaire la charge du système électrique du pays. Les systèmes hybrides du deuxième groupe fonctionnent en régime isole ou en mode autonome. Ils doivent répondre aux besoins des consommateurs situes dans des sites éloignes du réseau électrique : refuges de montagne, iles, villages isolés, panneaux de signalisation routière, etc.

1.7.1.2. Structure du système hybride

Trois critères peuvent être pris en compte dans le classement en fonction de la structure du système. Le premier critère est la présence ou non d'une source d'énergie classique. Cette source conventionnelle peut être un générateur diesel, une micro turbine a gaz, et dans le cas d'une étude du réseau électrique complet une centrale tout entière. Un second critère possible est la présence ou non d'un dispositif de stockage. La présence d'un stockage permet d'assurer une meilleure satisfaction des charges électriques pendant les périodes d'absence d'une ressource primaire a convertir en électricité. Les dispositifs de stockage peuvent être des batteries rechargeables, des électrolyseurs avec réservoirs d'hydrogène, des volants d'inertie, etc.

La dernière classification possible est celle relative au type de sources d'énergie renouvelables utilisées. La structure du système peut contenir un système photovoltaïque, une éolienne, un convertisseur d'énergie hydraulique (centrales hydroélectrique ou utilisation des vagues) ou une combinaison de ces sources. Un critère important pour la sélection de la source utilisée est le potentiel énergétique disponible qui dépend de l'endroit d'installation du système hybride. Un autre facteur déterminant est le consommateur électrique alimente. Son importance détermine le besoin d'une source supplémentaire, d'un dispositif de stockage et/ou d'une source conventionnelle, etc. Une généralisation de la classification présentée est illustrée sur la figure 1.11 (Stoyanov L, 2011).

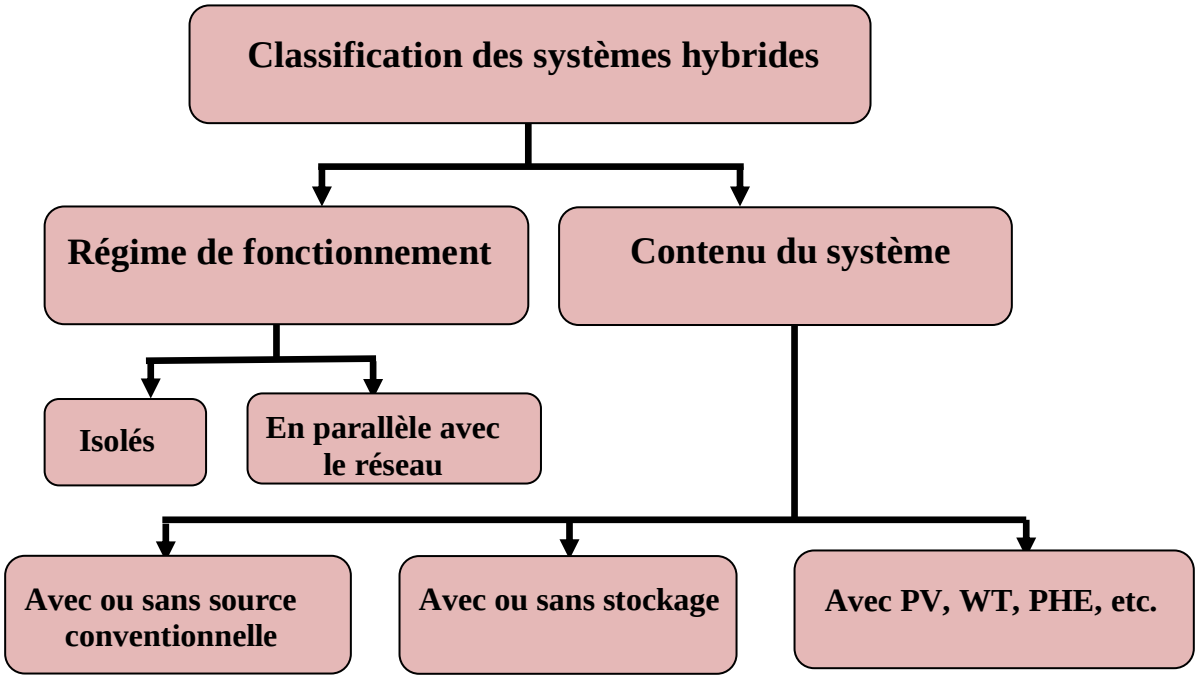


Figure 1.11: Classification des systèmes hybride (Stoyanov L, 2011).

1.8. Présentation du Programme National des Energies Renouvelable (PNER)

La tendance en Algérie vers une forte urbanisation et la volonté d'atteindre des taux de croissance élevés. Imposés par un accroissement démographique important. Augmentera la population algérienne qui sera de l'ordre de 45.2 d'habitants en 2030 selon le Schéma National d'Aménagement du Territoire (SNAT, 2010), ce qui impliquera pour les prochaines années un niveau élevé de demande d'énergie. Par ailleurs, la pression environnementale mondiale sur le champ économique et social, exercée à travers les conventions internationales, les normes et les directives contraignantes, particulièrement dans le domaine des énergies fossiles, incite à l'utilisation des énergies renouvenlables.

L'Algérie amorce une dynamique d'énergie verte en lançant un programme ambitieux de développement des énergies renouvelables et d'efficacité énergétique. Une stratégie axée sur la mise en valeur des ressources inépuisables comme le solaire et leur utilisation pour diversifier les sources d'énergie et préparer l'Algérie à demain. Le programme consiste à installer une puissance d'origine renouvelable de près de 22.000 MW entre 2011 et 2030 dont 54.5% seront dédiés à couvrir la demande nationale en électricité et 45.5% à l'exportation (PNER, 2011).

Arrêté du 2 février 2014 fixant les tarifs d'achat garantis et les conditions de leur application pour l'électricité produite à partir des installations utilisant les filières solaires

photovoltaïques et éoliennes ainsi que les conditions de leur application ont été fixés par deux arrêtés ministériels (Journal officiel, 2014).

Le gouvernement algérien a adopté fin février 2015 son programme de développement des énergies renouvelables 2015-2030. Une première phase du programme, démarrée en 2011, avait permis la réalisation de projets pilotes et d'études sur le potentiel national. Le nouveau programme précise les objectifs d'installations d'ici à 2030 :

-13 575 MWc de solaire photovoltaïque,

-5 010 MW d'éolien,

-2 000 MW de solaire thermodynamique ,

-1 000 MW de biomasse (valorisation des déchets),

-400 MW de cogénération,

-15 MW de géothermie.

Le total s'élève ainsi à 22 GW, dont plus de 4.5 GW doivent être réalisés d'ici à 2020. En raison de leurs coûts encore élevés, les centrales hélio-thermodynamiques ne seront véritablement développées qu'à partir de 2021. Ce programme doit permettre à l'Algérie de produire 27 % de son électricité à partir des énergies renouvelables d'ici à 2030, afin d'épargner ses réserves en gaz. La réalisation du programme est ouverte aux investissements publics et privés, nationaux comme étrangers. Des tarifs d'achat garantis sur 20 ans ont été mis en place pour les filières photovoltaïque et éolienne. Les projets des autres filières seront financés à hauteur de 50 % à 90 %, taux variable selon la technologie et la filière, par le fonds national des énergies renouvelables et cogénération (FNERC), alimenté par un prélèvement de 1 % sur la redevance pétrolière (CREG, 2017).

Le groupe Sonelgaz s'est investi dans le domaine des énergies nouvelles et renouvelables. Dans son programme de développement des énergies renouvelables, le groupe prévoit la réalisation de 67 projets de centrales électron-solaires, dont 27 centrales photovoltaïques, 27 centrales hybrides, 6 centrales solaires thermiques et 7 centrales éoliennes. Les plus puissantes centrales solaires seront de type solaire thermique, avec une capacité maximale de 400 MW pour l'une d'entre elles. Pour une question d'efficacité optimale, elles seront toutes installées dans les régions du sud, notamment dans les wilayas d'Adrar, d'El Oued et de Béchar.

1.9. Consommation d'énergie dans le secteur résidentiel en Algérie

Le secteur bâtiment (résidentiel, tertiaire et agricole) est le premier secteur consommateur d'énergie prés de 43% de la consommation énergétique finale du pays en 2015 (ME, 2016), suivi parle transport, avec 36.5% et enfin l'industrie et le BTP, avec 20.8% (figure 1.12).

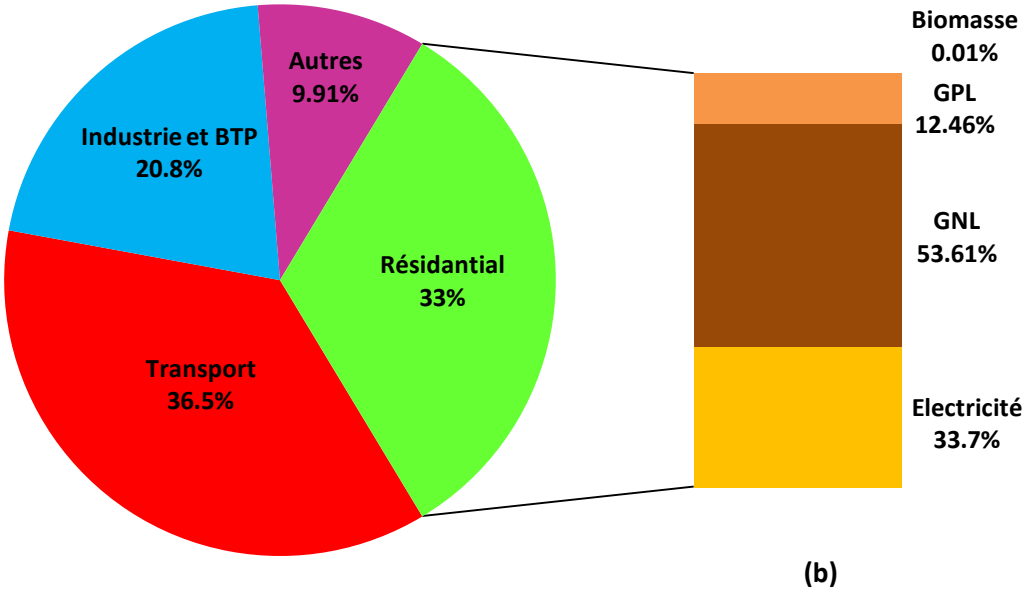


Figure 1. 12 : (a) Structure de la consommation finale par secteur d'activité, (b) Mix énergétique du secteur résidentiel en 2015 (ME, 2016).

Cette consommation énergétique est appelée à augmenter rapidement dans les années futures pour des raisons :

- de croissance démographique, le nombre important de logements livrés ainsi que l'accroissement du nombre de clients BT qui a avoisiné 350 000 nouveaux clients
- l'évolution importante du parc du bâtiment à cause des grands programmes annonces : Programme Ecobat, etc.
- l'augmentation sensible du taux d'équipement des logements en appareils électroménagers et de confort thermiques du fait de l'amélioration du niveau de vie et la baisse des prix de ces équipements (chauffage, climatisation, chauffage de l'eau, réfrigération, etc.).

L'observation du mix énergétique du secteur résidentiel, en énergie finale (Figure 1.12 (b)), montre la prédominance actuelle du gaz naturel et de l'électricité (respectivement 53.61 %

et 33.7 % des consommations) par rapport au gaz de pétrole liquéfié (GPL) et à la biomasse (bois) (respectivement 12.46 % et 0.01 % de la consommation globale) (ME, 2016).

La figure 1.13 représente l'évolution de la consommation d'énergie finale des différents secteurs d'activité.

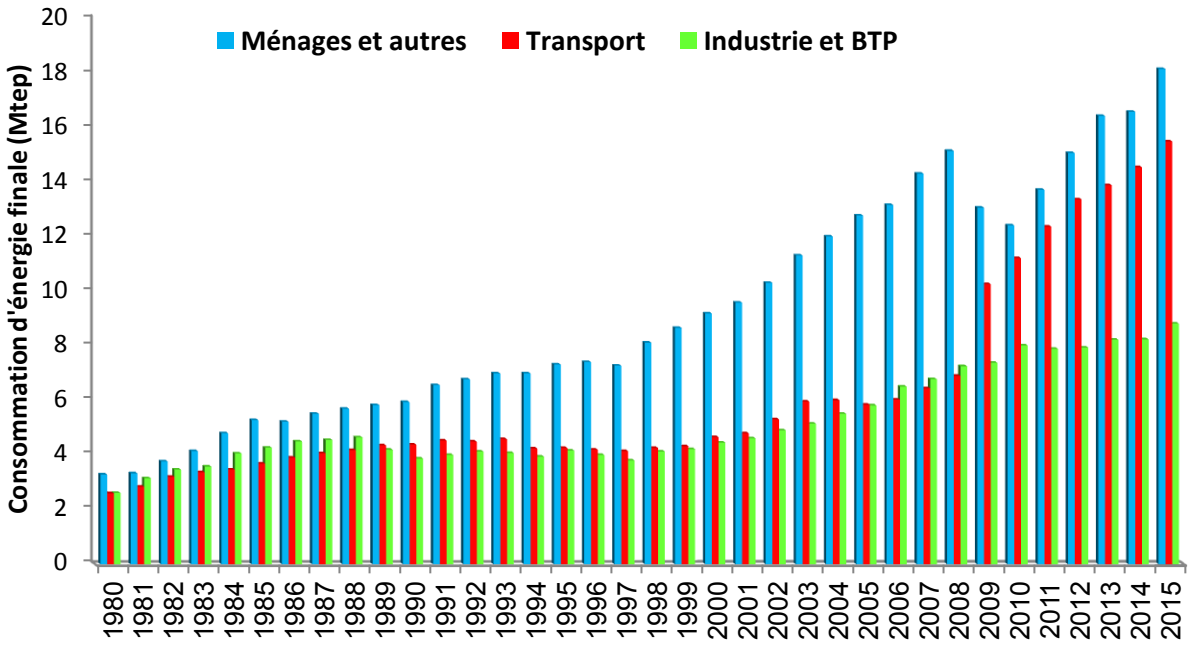


Figure 1.13: Evolution de la consommation d'énergie finale des différents secteurs d'activité. (ME, 1980 - 2016).

La consommation en énergie finale des secteurs ménages et autres est passé de 3.28 Mtep en 1980 à de 18.14 Mtep en 2015 (ME, 2016).

1.10. Démographie et parc de logements

1.10.1. Evolution du parc logement

La consommation d'énergie totale du secteur résidentiel dépend essentiellement du parc logement et de la population. La figure 1.14 représente l'évolution du parc logement et de la population jusqu'en 2012.

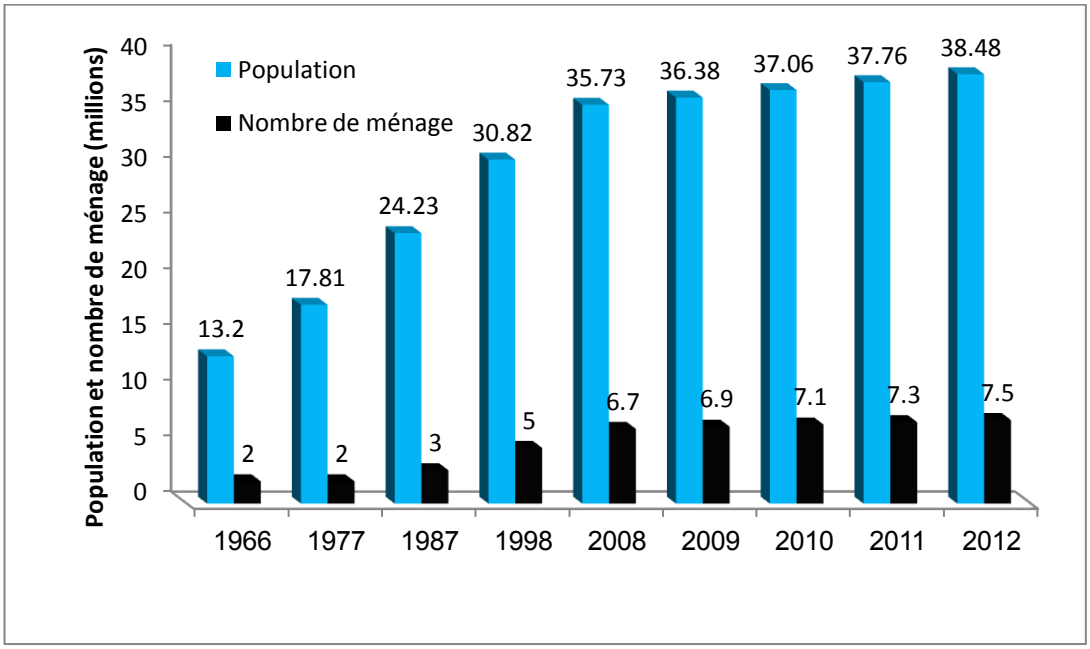


Figure 1. 14: Evolution du parc logement (1966 – 2012) (Heraou A, 2011) (ONS, 2015).

En Algérie, le nombre de ménages a évolué depuis l'année 1966 de 2 millions pour atteindre 7.7 millions en 2012. Cette augmentation du nombre de logements est destinée pour répondre à l'augmentation de la population qui a atteint 38.4 millions en 2012 (Gouareh A, 2017).

La demande de logements augmentera sous l'effet de la pression démographique. La figure 1.15 présente le parc logement, habité et non habité en 2008 est à 6 236 le type de construction.

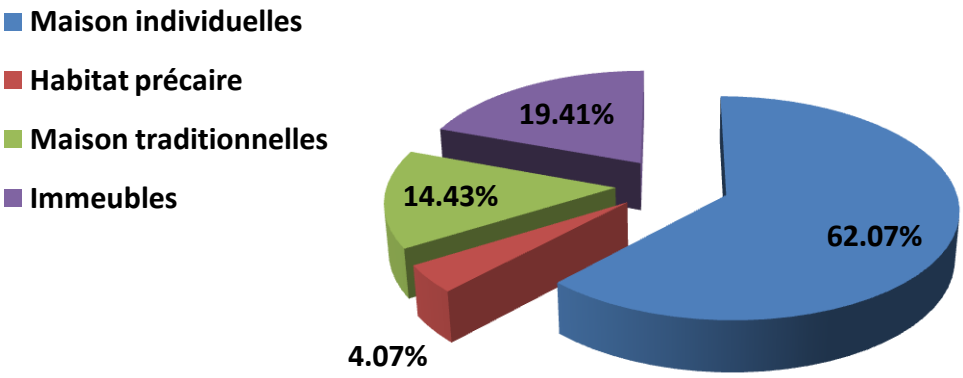


Figure 1.15: Répartition du parc total de logement selon le type de construction en 2008 (Ouadah R.S, 2013).

Pour prendre connaissance du degré de satisfaction de la population en logement, on procède au calcul du Taux d'occupation par logement.

1.10.2. Taux d'occupation

Le taux d'occupation est le rapport entre le nombre de population totale et le taux de logements habités. Le taux d'occupation est de 70 % (3.5 millions de logements occupés en 1998 pour 5 millions de logements) à 81.3 % (6.1 millions en 2012 pour 7.5 millions de logements), comme représenté dans la figure 1.16 (Gouareh A, 2017).

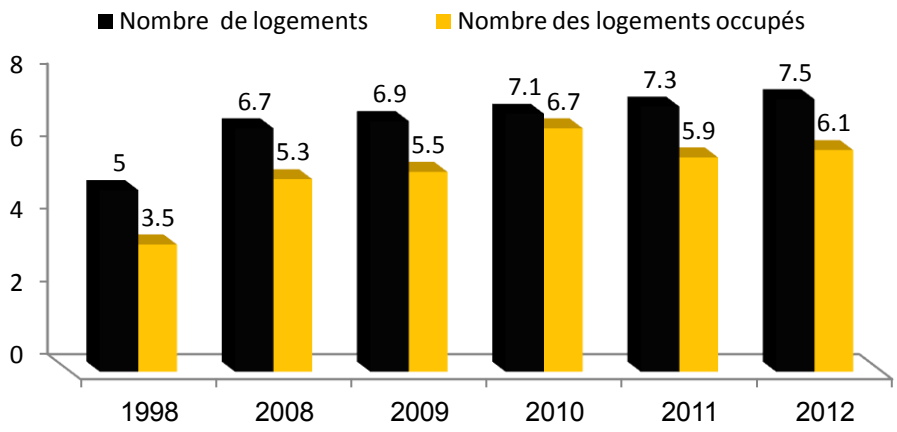


Figure 1. 16 : Evolution du nombre des logements occupés.

1.10.3. Nombre des personnes par logement

Le nombre de personnes par ménage décroît au cours des années de 7.6 personnes/logement en 1977 à 6.4 en 2008 comme le montre la figure 1.17 (Gouareh A, 2017).

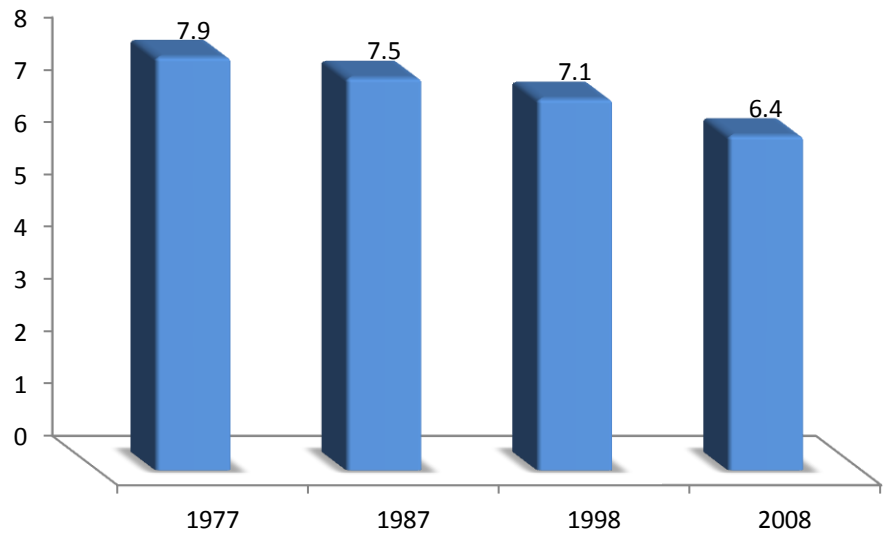


Figure 1.17: Evolution du nombre des personnes par ménage.

1.10.4. Taux d'électrification et de raccordement en gaz naturel

Dès son indépendance, en 1962, l'Algérie avait opté pour le développement du secteur de l'énergie, dans le cadre d'une politique nationale visant le développement des infrastructures électriques et gazières. Cette politique prévoit l'accès de la population à l'électricité et au gaz naturel comme une priorité absolue pour l'amélioration de la qualité de vie du citoyen et de la situation économique du pays. La charte nationale en 1976, annonça la volonté de généralisation de l'électrification des ménagers à travers tout le territoire national. Ces dernières années, la demande en électricité a connu une évolution importante et particulièrement en périodes estivale, atteignant des pics de consommation importants. Cette forte augmentation de la demande est une conséquence directe du changement des habitudes du consommateur et l'amélioration de sa qualité de vie, ainsi que la pulsion donnée au secteur économique et industriel.

Conscient de cet enjeux et de l'importance de l'accès à l'électricité pour les citoyens, le secteur s'est fixé comme priorité de développer tous les axes permettant de garantir la couverture à long terme, des besoins en électricité et en gaz du pays, notamment par la diversification des sources d'énergie, le développement du parc de production électrique et des infrastructures de transport et de distribution de l'électricité et du gaz.

Le taux d'électrification en Algérie est parmi les plus élevés dans le monde. Nous avons pu électrifier le pays à hauteur de 99% en raccordant plus de sept millions de foyers par des réseaux interconnectés quand cela était possible et par des réseaux isolés et déconcentrés quand cela était nécessaire pour le reste du territoire. L'Etat a toujours apporté une aide adaptée aux

difficultés spécifiques de chaque région du pays en assurant partout l'accès à l'énergie et en y consentant des efforts colossaux. Des financements importants ont été mobilisés par l'Etat pour le secteur de l'électricité et du gaz exigeant ainsi de Sonelgaz de développer des capacités de maîtrise d'œuvre exceptionnelles pour élaborer des études, mobiliser les moyens de réalisation appropriés, effectuer des achats d'équipements et superviser les travaux engagés dans le cadre de ces premiers plans mais aussi de ce qui allait suivre en terme de plans quadriennaux et quinquennaux de développement. La production d'électricité a ainsi fortement augmenté passant de 1,1 TWh en 1962 à 68.57 TWh à fin 2015 (ME, 2016).

Le nombre total des localités raccordées en gaz naturel est passé de 6 localités en moyenne par an entre 1962 et 2000 à environ 100 localités par an ces cinq dernières années. A fin 2012, il y aura près de 1 655 localités desservies en gaz naturel à travers un réseau de distribution de gaz de près de 60 000 km, alimentant aujourd'hui environ 3,5 millions de foyers (Gouareh A, 2017). Ces taux de couvertures de près de 99% en électricité et plus de 47 % en terme de desserte de gaz par canalisations ont modifié le mode de consommation des algériens et ont substantiellement amélioré leur confort.

C'est ainsi que la qualité de vie des algériens c'est traduite par une meilleure consommation spécifique en électricité des foyers qui est passée de 584 kWh par an en 1962 à près de 2900 kWh en 2011, quant à celle du gaz naturel, elle est passée respectivement de 1720 kWh à près de 13 600 kWh (Boutarfa N, 2012).

Plus particulièrement pour l'électricité ; pour maintenir et améliorer à court terme l'aspiration des algériens à mieux vivre, il sera nécessaire de porter d'ici à 2017 la capacité installée actuelle des moyens de production qui est de près de 12 500 MW pour une demande en pointe été de 10 360 MW à plus de 24 000 MW avec une pointe été prévue de 20 000 MW. C'est dire l'effort attendu où il s'agira de doubler les infrastructures électriques en moins de 5 ans. Vecteurs de développement socio-économique, l'électricité et le gaz n'ont pas cessé de connaître une demande sans cesse croissante atteignant ces dernières années des taux d'évolution à deux chiffres. C'est pourquoi d'importants plans de développement continueront d'être mis en œuvre.

1.11. Efficacité énergétique

L'efficacité énergétique est appelée à jouer un rôle important dans le contexte énergétique national, caractérisé par une forte croissance de la consommation, notamment, par le

secteur domestique avec la construction de nouveaux logements, la réalisation d'infrastructures d'utilité publique et la relance de l'industrie. L'adoption par le gouvernement du programme national sur l'efficacité énergétique à l'horizon 2030, réaffirme cette dernière comme priorité. La réalisation de ce programme par une diversité d'actions et de projets, devrait favoriser l'émergence, à terme, d'un marché durable de l'efficacité énergétique en Algérie.

Les retombées économiques et sociales de l'intégration de la dimension efficacité énergétique dans les différents secteurs d'activité sont multiples. Cette intégration permet d'améliorer le cadre de vie du citoyen mais constitue, également, une réponse appropriée au défi de conservation de l'énergie avec ses implications bénéfiques sur l'économie nationale, en termes de création d'emplois et de richesse, en plus de la préservation de l'environnement.

Le programme se focalise sur les secteurs de consommation qui ont un impact significatif sur la demande d'énergie. Il s'agit principalement du bâtiment du transport et de l'industrie (APRUE, 2015).

1.11.1. Politique d'efficacité énergétique en Algérie

L'Algérie grand pays exportateur de pétrole et de gaz a vu sa politique énergétique changé après le premier choc pétroliers, ainsi la diminution des cours du pétrole a vidé les caisses de l'état et par la même ses capacités à financer l'économie du pays. C'est ainsi que pour la première fois les responsables ont pris conscience de l'obligation de définir une politique d'efficacité énergétique, le ministère de l'énergie a proposé un modèle de consommation énergétique basé sur le recours au gaz naturel et le développement du GPL dans les transports. La politique énergétique algérienne, repose aujourd'hui sur quatre axes : une agence nationale pour la promotion et la rationalisation de l'utilisation de l'énergie ; un cadre réglementaire assuré par la loi de 1999 ; un fonds national pour la maîtrise de l'énergie et des mesures d'incitations et d'accompagnement.

Le Programme National de Maîtrise de l'Energie (PNME) constitue le cadre d'exercice de la politique algérienne d'efficacité énergétique, puisqu'il définit ses objectifs et les moyens de sa mise en œuvre sur la base d'études de prospectives énergétiques et de données socioéconomiques. Le programme se décline sous forme d'un plan d'action qui s'intéresse à l'ensemble des secteurs de consommation, notamment celui du bâtiment. Aussi, pour assurer l'animation et la coordination de la politique de maîtrise de l'énergie, l'Algérie met en place en

2004 le Comité intersectoriel de la maîtrise de l'énergie. Ce Comité a notamment pour mission d'organiser la concertation et le développement des partenariats public privé. Dans les années 1990, l'Algérie développe plusieurs dispositifs réglementaires quant à l'efficacité énergétique dans l'habitat. Suite à une réflexion sur la consommation des logements neufs initiée en 1995, le ministère de l'Habitat et de l'Urbanisme met en place des documents techniques réglementaires (DTR) en 1997. Ceux-ci déterminent notamment les valeurs de référence relatives aux déperditions et aux apports calorifiques concernant les bâtiments neufs à usage d'habitation et tertiaire, les méthodes de calcul des déperditions et des apports calorifiques, les valeurs limites pour le climat intérieur des locaux, il détermine aussi les zones climatiques. Ces DTR ont par la suite été approuvés par le ministère de l'Énergie et des Mines et ont fait l'objet, en 2000, d'un décret portant sur la réglementation thermique dans les bâtiments neufs en application à la loi relative à la maîtrise de l'énergie adoptée le 28 juillet 1999. Outre les normes et exigences d'efficacité énergétique portant sur l'isolation thermique dans les bâtiments neufs, la loi sur la maîtrise de l'énergie introduit des normes de performance énergétique des appareils fonctionnant à l'électricité, au gaz et aux produits pétroliers. Cette loi prévoit également le financement des actions relatives à la maîtrise de l'énergie par la mise en place d'un Fonds national, qui permettra notamment de mettre en œuvre les différentes mesures incitatives financières prévues par cette même loi. (APRUE, 2015)

L'APRUE dispose d'un certain nombre de programmes et d'initiatives visant la maitrise de l'énergie dans le secteur du bâtiment:

1.11.2. Programme ECO-BAT

Le programme vise l'amélioration du confort thermique dans les logements et la réduction de la consommation énergétique pour le chauffage et la climatisation, la mobilisation des acteurs du bâtiment autour de la problématique de l'efficacité énergétique et la provocation d'un effet d'entraînement des pratiques de prises en considération des aspects de maîtrise de l'énergie dans la conception architecturale.

Le projet portera sur la réalisation de 600 logements à haute performance énergétique. Ces logements intégreront les principes de confort thermique et d'économie d'énergie dans la conception architecturale, le choix des matériaux de construction ainsi que dans les détails de mise en œuvre. La mise en œuvre du programme ECO-BAT sera soutenue par des mesures incitatives sous forme d'expertise et d'un apport financier du Fond National pour la Maîtrise de

l'Energie (FNME). Elle sera également accompagnée d'une bonne médiation ainsi que du lancement de cycles de formation à destination des bureaux d'études et des maîtres d'ouvrage. Enfin, des journées techniques regroupant l'ensemble des acteurs du secteur du bâtiment seront également organisées.

Dans le cadre de la mise en œuvre de ce projet, un accord de partenariat a été signé entre l'APRUE et onze Offices de Promotion et de Gestion Immobilière (OPGI) en mai 2009 au ministère de l'habitat et du développement urbain. Cet accord définit les conditions pour l'intégration des mesures d'efficacité dans 600 logements pilotes dans les différentes zones climatiques du pays (répartis sur onze wilayas, figure 1.18); le financement des coûts supplémentaires est assuré à travers le Fonds national de maîtrise de l'énergie.

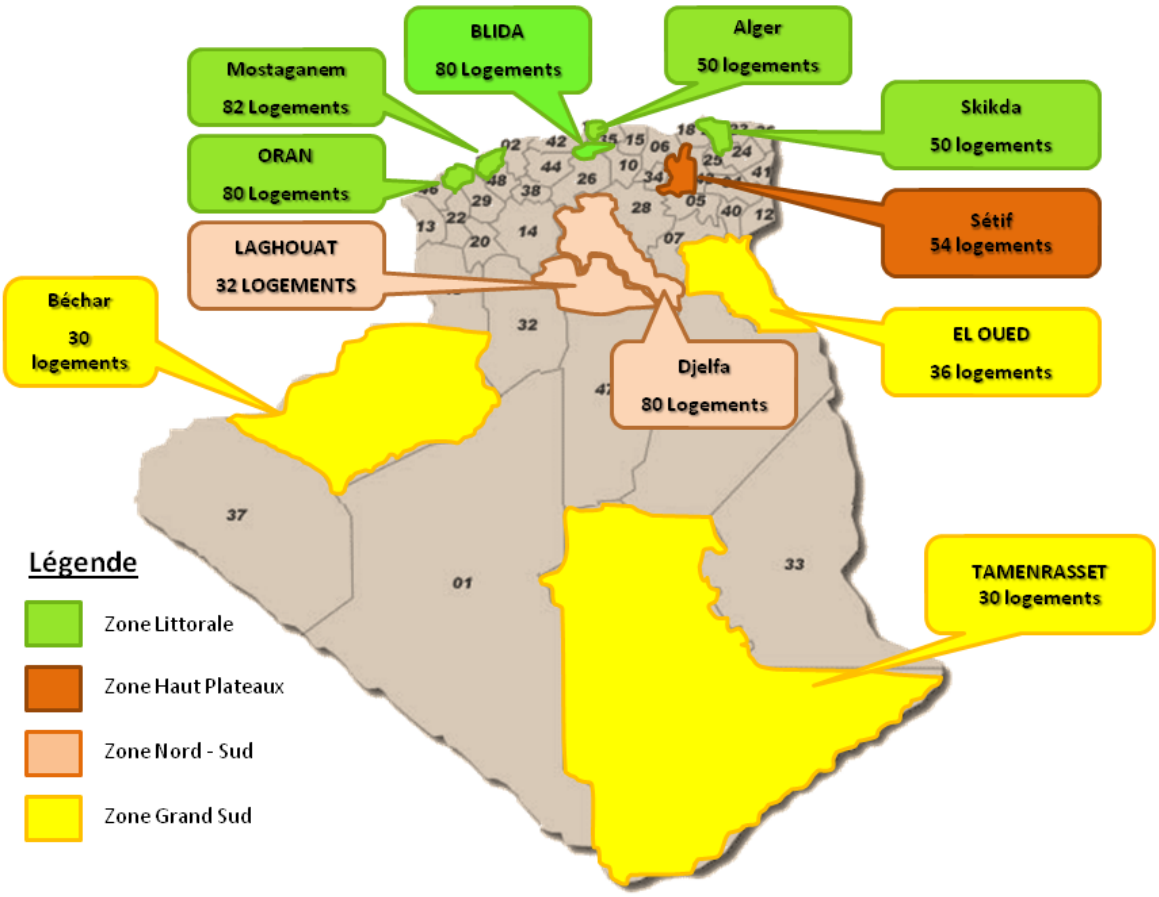


Figure 1.18: Onze wilayas dont le projet des BHE sera réalisé.

Parmi les solutions techniques devants être mis en pratique dans la réalisation du projet, on site qu'en hiver on cherche à limiter les déperditions thermiques (isolation) et en été c'est la

protection solaire et la ventilation naturelle. Pour clarifier plus, on peut dire qu'on construire en général avec:

- Polystyrène dans la lame d'air;
- Mur en Béton de terre stabilisée;
- La menuiserie double vitrage.

Pour les logements en cours de réalisation, les surcoûts à la construction sont estimés de 12 à 15% du prix du mètre carré habitable (Saifi N, 2015).

Tableau 1.2: Projet des BHE dans la wilaya de Eloued, Skikda et Laghouat.

Wilaya	Projet
Eloued	▪ Utilisation de la végétation ▪ -Réduction des ouvertures sur la façade ouest ▪ Prolongement des façades projeteuses d'ombre ▪ -Emploi de la coupole pour favoriser le mouvement aéraulique ▪ -Utilisation des moucharabiehs comme protections solaires ▪ - Combinaison de l'inertie et de la ventilation
Skikda	▪ Protection solaires par des saillies sur les façades ▪ -Isolation thermique des parois extérieures ▪ -Emploi du double vitrage
Laghouat	▪ -Protection solaires par des volets orientables et amovibles ▪ -Inertie thermique : Murs extérieurs et intérieur en BTS et ▪ revêtement de sol en terre cuite ▪ Étanchéité saharienne sur les planchers terrasses ▪ Double vitrage et couleur blanche sur les façades exposées ▪ au soleil

1.11.3. Programme triennal d'efficacité énergétique 2011-2013

Le programme triennal d'efficacité énergétique "2011-2013" émane lui même du programme national des énergies renouvelables et d'efficacité énergétique, adopté par le Conseil des Ministres en février 2011. Le programme d'efficacité énergétique, obéit à la volonté de l'Algérie de favoriser une utilisation plus responsable de l'énergie et d'explorer toutes les voies concourant à la préservation des ressources et la systématisation d'une consommation utile et

optimale. Ce programme concerne les volets suivants : L'isolation thermique des bâtiments ; Le développement du chauffe-eau solaire ; La généralisation de l'utilisation des lampes basse consommation, L'introduction de l'efficacité énergétique dans l'éclairage public; L'aide à l'introduction de l'efficacité énergétique dans le secteur industriel et les établissements grands consommateurs d'énergie, par la réalisation d'audits et l'aide aux projets d'économie d'énergie ; L'augmentation de la part de marché du Gaz de pétrole liquéfié carburant et la promotion du Gaz Naturel Carburant la conversion des centrales électriques au cycle combiné quand cela est possible ; La réalisation de projets pilotes de climatisation au solaire. L'APRUE est chargée de réaliser le programme d'efficacité énergétique notamment par: L'isolation thermique des bâtiments; La généralisation de l'utilisation des lampes à basse consommation d'énergie; L'introduction de la performance énergétique dans l'éclairage public ; La promotion de l'efficacité énergétique dans le secteur industriel; La promotion du Gaz de pétrole liquéfié carburant; La promotion du Gaz Naturel Carburant; Introduction des principales techniques de climatisation solaire (CDER, 2012).

1.11.4. Programme de développement quinquennal 2010-2014

Une enveloppe financière de plus de 3.700 milliards de dinars, soit l'équivalent de 50 milliards de dollars, est allouée au secteur de l'Habitat pour la construction de deux millions de logements et la réhabilitation du tissu urbain sur la période 2010-2014.Sur la totalité des engagements financiers de l'ordre de 2.214 milliards DA (près de 286 milliards de dollars) qui seront mobilisés par le nouveau programme quinquennal d'investissements publics, une part de 17.4% sera ainsi affectée pour résorber le déficit en logements au niveau national. Il s'agira de réaliser 500.000 logements locatifs, 500.000 logements promotionnels, 300.000 logements dans le cadre de la résorption d'habitations précaires et 700.000 logements ruraux. Un total de 1,2 million de logements sera livré durant le quinquennat 2010-2014, tandis que le reste, soit 800.000 logements, sera achevé entre 2015 et 2017 (Programme de développement quinquennal 2010-2014, 2010).

1.11.5. Nouveau programme national sur l'efficacité énergétique (2016-2030)

L'efficacité énergétique est appelée à jouer un rôle important dans le contexte énergétique national, caractérisé par une forte croissance de la consommation, notamment, le secteur domestique avec la construction de nouveaux logements, la réalisation d'infrastructures d'utilité publique et la relance de l'industrie.

L'adoption par le gouvernement du programme national sur l'efficacité énergétique à l'horizon 2030, réaffirme cette dernière comme priorité. La réalisation de ce programme par une diversité d'actions et de projets, devrait favoriser l'émergence, à terme, d'un marché durable de l'efficacité énergétique en Algérie.

Les retombées économiques et sociales de l'intégration de la dimension efficacité énergétique dans les différents secteurs d'activité sont multiples. Cette intégration permet d'améliorer le cadre de vie du citoyen mais constitue, également, une réponse appropriée au défi de conservation de l'énergie avec ses implications bénéfiques sur l'économie nationale, en termes de création d'emplois et de richesse, en plus de la préservation de l'environnement.

Le programme se focalise sur les secteurs de consommation qui ont un impact significatif sur la demande d'énergie. Il s'agit principalement du bâtiment du transport et de l'industrie.

Pour le secteur du bâtiment, le programme vise à encourager la mise en œuvre de pratiques et de technologies innovantes, autour de l'isolation thermique des constructions. Des mesures adéquates seront prévues au niveau de la phase de conception architecturale des logements. Il s'agit également de favoriser la pénétration massive des équipements et appareils performants sur le marché local, notamment les chauffe-eau solaires et les lampes économiques : l'objectif étant d'améliorer le confort intérieur des logements en utilisant moins d'énergie. La mise en place d'une industrie locale des isolants thermiques et des équipements et appareils performants (chauffe-eau solaires ; lampes économiques) constitue l'un des atouts pour le développement de l'efficacité énergétique dans ce secteur. Globalement, c'est plus de 30 millions de TEP qui seront économisées, d'ici 2030 (CDER, 2015).

1.12. Classification des bâtiments a efficacités énergétiques

Les bâtiments énergétiquement efficaces sont classés en quatre catégories: bâtiments basse consommation, bâtiments passifs, bâtiments à consommation nulle (autonome) et bâtiments à énergie positive ou zéro énergie.

1.12.1. Bâtiment à Basse Consommation Energétique (basse énergie)

La notion de bâtiment à Basse Consommation Energétique (BBC) est un concept récent qui découle des améliorations successives de la performance énergétique des bâtiments (Blervaque H, 2014). Ils se caractérisent principalement par une conception architecturale,

bioclimatique, une bonne isolation thermique (15 à 20 cm d'isolant), 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…) et une attention particulière est portée à la perméabilité de l'air et aux ponts thermiques. On a également recours à des sources d'énergies renouvelables pour la production d'énergie, comme le solaire, l'air, la géothermie ou le bois (Chlela F, 2008). Les bâtiments à usage autre que d'habitation sont considéré BBC lorsque la consommation conventionnelle d'énergie primaire du bâtiment pour le chauffage, le refroidissement, la ventilation, la production d'eau chaude sanitaire et l'éclairage est inférieure ou égale à 50% de la consommation conventionnelle de référence, définie par l'article 9 de l'arrêté du 24 mai 2006 relatif à la réglementation thermique 2005. Pour les bâtiments d'habitation l'objectif de performance BBC est fonction de la zone climatique et de l'altitude. La consommation conventionnelle d'énergie primaire du bâtiment pour le chauffage, le refroidissement, la ventilation, la production d'eau chaude sanitaire et l'éclairage doit être inférieure à 50 kWh/m^2/an pondéré d'un coefficient géographique (Saifi N, 2015).

1.12.2. Bâtiments passifs

Un bâtiment passif est défini comme étant un bâtiment dans lequel l'ambiance intérieure est confortable tant en hiver qu'en été, sans devoir faire appel ni à un système conventionnel de chauffage ou de refroidissement. Les apports passifs solaires et internes et les systèmes de ventilation suffisent à maintenir une ambiance intérieure confortable toute l'année. Ce concept inclut également une réduction des besoins en électricité spécifique et éventuellement une production d'électricité à base de sources d'énergie renouvelables. En pratique, un petit système d'appoint est nécessaire au maintien du confort thermique durant les jours les plus froids ; il est le plus souvent associé à la ventilation (Benradouane N.R, 2010).

1.12.3. Bâtiments autonomes

Un bâtiment est autonome lorsque sa fourniture énergétique ne dépend d'aucune ressource distante. Ainsi la totalité de l'énergie consommée par le bâtiment est produite sur place à partir de ressources locales. En pratique, le bilan net d'énergie de ce bâtiment est nul à tout instant. Un tel bâtiment se passe des avantages apportés par les réseaux d'approvisionnement (foisonnement, sécurité d'approvisionnement), ce qui impose l'usage de moyens de stockage d'énergie (batteries d'accumulateurs, inertie thermique, etc.). Ce type de bâtiment est

particulièrement adapté aux sites isolés ou insulaires car il évite les coûts de raccordement aux divers réseaux (Benradouane N.R, 2010).

1.12.4. 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 n'en consomme. Ce bâtiment est raccordé à un réseau de distribution d'électricité vers lequel il peut exporter le surplus de sa production électrique. De nombreux programmes d'opérations concernant les bâtiments zéro énergie ou à énergie positive sont en cours à l'étranger, comme au Japon, Etats-Unis, Canada, Allemagne et Nouvelle-Zélande. A l'exception du Japon, ces opérations sont basées sur le même concept de bâtiment. Les besoins d'énergie pour le chauffage, le refroidissement et l'électricité sont réduits à travers une bonne conception de l'enveloppe et des équipements performants et économes. Le complément des besoins d'énergie est comblé par des sources d'énergie renouvelables comme le solaire photovoltaïque et thermique. Au Japon, Une isolation thermique vraiment efficace, garantissant aux habitants le confort le plus élevé et la meilleure rentabilité, est plutôt l'exception à la règle. Il n'y a pas non plus de valeurs limites à respecter. Les maisons vendues au Japon comme «zéro énergie» sont des maisons avec une isolation conventionnelle utilisant les technologies solaires photovoltaïques et thermiques pour produire autant voire plus d'énergie que leurs besoins annuels (Chlela F, 2008).

1.12.4.1. Exemples de réalisation

Maison à énergie positive de Fellbach : Il s'agit d'une maison individuelle située dans la ville de Fellbach en Allemagne (figure 1.19) (Chlela F, 2008). Le principe de cette maison est de réduire les besoins de chauffage en travaillant l'enveloppe, soit à environ 11 kWh/m²an, et d'assurer ces besoins à l'aide d'une pompe à chaleur réversible alimentée en électricité photovoltaïque. La maison est compacte avec la présence d'une véranda au sud, et une façade nord aveugle. Les caractéristiques de l'enveloppe vérifient les exigences du label Passivhaus (voir Tableau 1.3).

Tableau 1.3: Caractéristiques de l'enveloppe de la maison à énergie positive de Fellbach

Parois	Caractéristiques
Parois opaques	$U = 0.1$ W/m^2°C (vitrages triples avec argon)
Fenêtres	$U = 0.7$ W/m^2°C (facteur solaire d'environ 0,5)
Etanchéité à l'air	0.5 Vol/h sous 50 Pa
Ponts thermiques	Pas de ponts thermiques

Le bâtiment comprend les systèmes suivants:

- Un système double flux avec échangeur haute efficacité sur l'air extrait.
- Une installation de puits climatique qui sert au préchauffage de l'air neuf en hiver et au rafraîchissement en été.
- Un toit photovoltaïque assurant une puissance de pointe de 8 kWp et produisant environ 7500 kWh/an.

Figure 1.19: Vues de la maison à énergie positive de Fellbach (Chlela et al, 2005).

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

1.13. Conclusion

L'augmentation de la demande mondiale en énergie, la raréfaction des ressources énergétiques fossiles et le changement climatique amorcé au cours des dernières décennies sont des réalités indéniables. Dans ce contexte énergétique, la mise en œuvre de mesures concrètes en faveur d'une plus grande sobriété énergétique de nos sociétés devient urgente. Dans la transition énergétique à opérer, le secteur résidentiel occupe une place de choix.

La contribution des énergies renouvelables dans la régulation de ce défi est primordiale. L'intégration des énergies renouvelables nous permet d'une part, de garder un environnement propre et sain et d'autre part, assurer la protection de la biodiversité.

Chapitre 2

Etat de l'art sur l'interaction climat et bâtiment

2.1. Introduction

La réduction des ressources d'énergies fossiles, et les modifications climatiques notables de la planète à cause l'augmentation des émissions de gaz à effet de serre, nous confrontent à des défis sociaux, économiques, énergétiques et environnementaux. Pour rechercher des solutions aux problèmes complexes posés, de nombreuses actions ont été menées, qui s'inscrivent dans des politiques de développement durable, concernent le secteur de la construction.

Le climat est l'une des principales données de la morphologie des systèmes architecturaux et urbains.

L'essor de l'architecture solaire puis bioclimatique permet à la fois la théorisation et la concrétisation de cette réflexion dans la production normale du cadre bâti. Cette expression vise principalement l'amélioration du confort qu'un espace bâti peut induire de manière naturelle, c'est-à-dire en minimisant le recours aux énergies non renouvelables, les effets pervers sur le milieu naturel et les coûts d'investissement et de fonctionnement. L'intérêt du bioclimatique va donc du plaisir d'habiter ou d'utiliser un espace à l'économie de la construction, ce qui en fait un facteur fondamental de l'art de construire. Pour cela, il faut veiller à préserver les ressources énergétiques conventionnelles, réduire les coûts des investissements énergétiques, notamment en matière de chauffage et de climatisation et réduire l'impact des énergies fossiles sur l'environnement (Spinner B et al, 2003). Le concepteur doit donc continuer à assurer l'abri et le confort de l'utilisateur, mais devra, de plus, faire en sorte que l'impact du bâtiment sur l'environnement soit minimisé.

Dans ce chapitre, nous traiterons les repères conceptuels et le confort thermique dans les habitats ainsi que les différentes stratégies d'adaptation climatique des architectures.

2.2. Historique des bâtiments

L'habitat, le concept le plus ancien de l'histoire de l'humanité, a accompagné cette dernière à travers les lieux et les temps, en occupant des espaces et prenant des formes, aussi variées, que la variété des repères qu'il se définit sous l'influence de facteurs naturels, sociaux ou culturels. Depuis son plus lointain passé, l'homme a toujours éprouvé un besoin de retrouver, à la fin de son labeur, un lieu de repos, lui procurant un peu de confort, et un lieu de refuge, lui assurant également un abri contre tous les dangers. Ce lieu a évolué à travers l'histoire, et a pris différentes formes, tout en n'étant pas, forcement, fixe et unique. Ce phénomène, constaté chez

toutes les espèces animales, s'est manifesté depuis le tout début de l'existence de l'homme, par son retour permanent, lors de son déplacement en quête de nourriture, vers des lieux précis lui offrant assurance et réconfort, en outre, de la sécurité en territoire peu ou pas connu, l'homme cherche à ne pas se perdre par rapport à son point de départ; c'est son chemin de fuite, le seul qu'il connaisse. Dans ce contexte là, les grottes de l'homme paléolithique en sont les meilleurs témoins. Cependant ce besoin n'était pas seulement physique et de subsistance matérielle. Il était également spirituel, reflétant la recherche d'un lieu propre à soi, lui permettant d'exprimer et matérialiser, en toute liberté ses propres représentations de son chez soi, à travers des marquages et délimitations tantôt fictives et tantôt concrètes. Les vestiges de l'homme de la préhistoire montrent le marquage de la délimitation et de l'appropriation de son espace par différentes formes telles que les amas de pierres ou de branches d'arbres servant de support pour les peaux d'animaux, etc. La concrétisation de ce besoin aux deux dimensions: matérielle et spirituelle, a évolué à travers les temps, et ce qui était un simple marquage, a connu des mutations diverses en fonction de ses deux dimensions de cet habitat. Cette évolution a été une double expression: La première, répondant à l'évolution de la conscience, et la conception que se fait l'homme du monde qui l'entoure et les représentations qu'il en fait, à travers sa projection à petite échelle dans le monde qu'il se crée pour lui-même. La deuxième, répondant à l'évolution des besoins de confort de l'homme et ses propres efforts afin d'améliorer la qualité de son environnement immédiat qu'est son habitat en fonction des spécificités du contexte et de la société dans lesquels il évolue. La double dimension qu'a prise l'habitat, l'a transformé d'un simple espace conquis périodiquement par l'homme, en un lieu ayant une identité spécifique et unique. Cette identité s'est forgée à travers sa relation implicite avec son habitant et par une interdépendance, qui les a réunis dans un interminable processus d'adaptation et réadaptation de chacun, par rapport à l'autre. C'est ainsi que le concept "habiter" a pris une signification plus profonde. Ce processus a élargi la signification du concept d'habitat du simple logis dans un environnement naturel vierge, en tout un environnement conquis, transformé et approprié par l'homme, dont l'abri n'est qu'une partie infime. La genèse de cette transformation était déjà présente dans les différentes formes d'appropriation de l'espace dans les premiers établissements humains découverts, "Pour s'approprier son espace l'habitant le clôt, même symboliquement, de façon à délimiter un territoire sur lequel il pourra inscrire sa marque. La définition du concept habiter par rapport à l'identification à son habitant, permet de retrouver un sens aux variations, illimités et uniques à chaque fois, des formes d'habitat à travers les temps, les espaces (ou plus exactement les lieux), et les sociétés. C'est spécialement ces trois derniers paramètres qui lui donnent son identité

unique par un temps spécifique en chaque instant, qu'est le maintenant, par un lieu spécifique qu'est le "ici" et par une société unique qui vit dans ces deux dimensions et définie par un "moi" (collectif ou individuel). Sans aller plus loin dans les sources de ces variations, on constate qu'en ces temps (mais également depuis fort longtemps), le concept habitat englobe tout l'environnement remodelé par l'homme par quelque moyen que ce soit, et que le concept habitation "n'est qu'une partie de ce grand ensemble (Meliouh F, 2001).

2.3. Repères conceptuels de l'habitat à travers l'histoire

Depuis l'antiquité l'homme a conçu son habitat en fonction de ses besoins. Mais comme ces besoins n'étaient pas uniquement de subsistance matérielle, son habitation prenait des formes dont l'interprétation ne pouvait se limiter qu'à ce facteur là, ni exclusivement à un seul autre facteur. " L'espace habité n'est donc ni neutre ni homogène, il possède des significations qui sont liées à l'ensemble de l'existence de l'habitant". En effet, les différentes formes d'habitations, qu'a conçues l'homme, font référence à des facteurs variés (et souvent associés), les ayant déterminées ou modifiées. Ces facteurs sont tous liés à deux entités l'homme et "'environnement.

En effet l'homme est le générateur même, de cette conception, ce qui crée une relative dépendance par rapport à l'homme comme "individu" unique et non stéréotypé, ayant des besoins, des aspirations à concrétiser, et des contraintes à surmonter."L'environnement" quant à lui est tout l'écosystème dans lequel évolue "l'homme" en tant qu'individu, et comprend l'environnement naturel, l'environnement social, et l'environnement culturel. Dans cet environnement l'homme retrouve des repères, auxquels il se fie, pour concevoir son habitation, par une prise en charge concrète ou symbolique. Une définition de ces repères peut être faite par rapport aux trois dimensions de l'environnement dans lequel évolue l'homme en tant qu'individu (Meliouh F, 2001).

2.3. 1. Repères conceptuels naturels

Toute construction est une révélation d'un lieu et une contribution à l'articulation continue de l'habitat humain. L'environnement naturel dans lequel évolue l'homme est un écosystème composé d'une multitude de facteurs dépendants les uns des autres. L'environnement étant composé du climat, du site, des matériaux et du paysage.

2.3. 1.1. Climat

Le climat est l'ensemble des circonstances atmosphériques propres à une région du globe. Il exprime les conditions régnantes, et se détermine par différents éléments, leur combinaison et leurs interactions. L'homme a très peu d'adaptation naturelle au climat, il doit lutter contre son environnement climatique par des actions et interventions: le feu, le vêtement, l'abri. Les principaux éléments climatiques relatifs à l'habitat sont: le rayonnement solaire, la température, l'humidité, les précipitations et le vent. L'exemple d'adaptation aux éléments climatiques, il suffit de citer un type d'habitat. Cet exemple est l'habitat troglodyte à Matmata en Tunisie, où le site, comme facteur naturel, est mis, au profit de l'habitat afin de se protéger contre un autre facteur naturel qu'est le climat (figure 2.1). En effet, l'habitation modelée dans le site même profite de l'inertie thermique de la terre pour stabiliser une température ambiante fraîche lorsque celle de l'extérieur est très rigoureuse et intolérable.

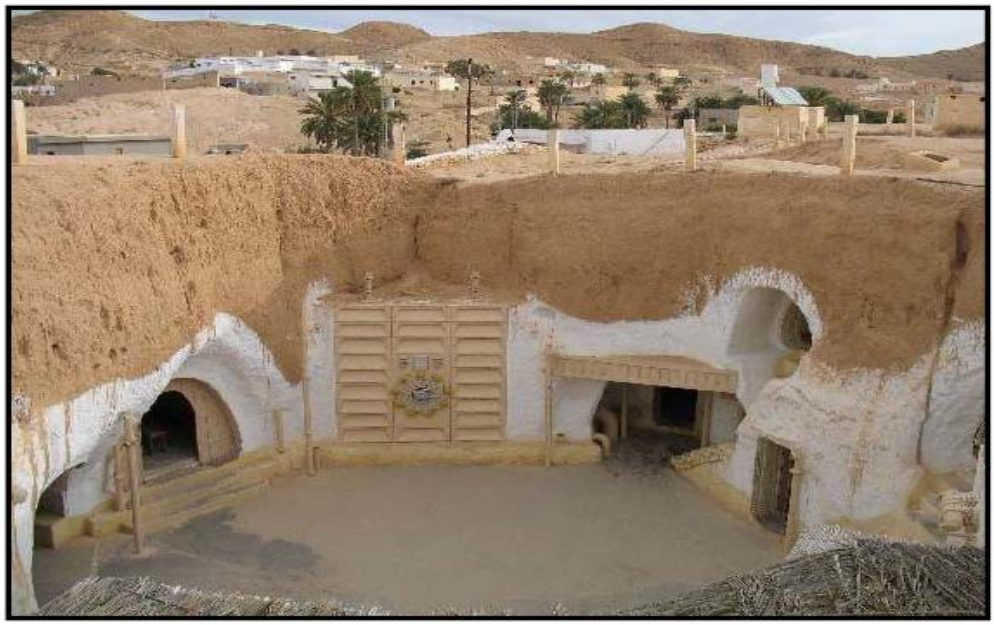


Figure 2.1: Habitat troglodyte à Matmata (Atlas mondial Encarta, 2012).

2.3. 1.2. Site

Le site est la superposition de plusieurs niveaux de la réalité où intervient (Viaro A, 1983):

- physique (montagne, vallées, plaines, rivières, etc.)
- pratique (utilisation du site physique pour la survie du groupe**)**

- symbolique (valeurs culturelles)

Le site influe à la fois sur l'établissement humain et sur la maison, mais il n'en détermine pas la forme. Le choix et le mode d'utilisation d'un site dépendent de deux groupes de facteurs, les uns ou les autres pouvant être dominants selon les cas, mais intervenant toujours en interaction;

- culturels: (historique, symbolique, religieux, sociaux, défensifs, etc.)
- pratiques:(présence d'eau à proximité, liés aux activités et facilités de protection contre les éléments naturels, la faune, les hommes, etc.)

Le site, en dépendant des buts et des valeurs d'un peuple et d'une époque, est la projection sur le terrain de l'image qu'une communauté se fait d'elle-même. A l'intérieur du site, les modes et les formes de groupement des habitants dans les établissements humains d'une part, et ceux- là mêmes d'autre part présentent une diversité extraordinaire. Cette diversité, qui exprime les multiples interactions des éléments culturels et physiques, se manifeste, aux deux extrêmes, par des modes de groupement dispersés ou groupés (figure 2.2 et 2.3).

Figure 2.2. Groupement dispersé: Habitat linéaire à Nias, Indonésie (Viaro M.A, 1984).

Figure 2.3: Groupement concentré l'habitat Pueblos an sud-ouest des Etats-Unis d'Amérique (Meliouh F, 2001).

2.3. 1.3. Matériaux de construction

Il existe quatre catégories de matériaux: la terre, la roche, les végétaux et les matériaux d'origine animale. Les matériaux ne déterminent pas la forme. Ils la rendent possible ou impossible, parfois la modifient. Seule la pénurie rend l'utilisation de matériaux impossible: c'est la contrainte fondamentale. Lorsque les matériaux existent, les choix d'utilisation sont culturels, climatiques, technologiques, et liés aux modes de production. Ceci explique pourquoi, avec des ressources identiques, les choix amènent à des habitats différenciés. Leur mise en œuvre peut être ramenée à trois grands types: moulé ou coulé, appareillé, ossaturé (Viaro M.A, 1983).

2.3. 1.4. Paysage

Il a agi sur son petit monde par la transformation de ses paysages par le décor, de sa sobriété par le luxe, de son climat par le conditionnement de son ambiance intérieure. Tous ces gestes sont des expressions d'une perpétuelle quête de confort.

2.3. 2. Repères conceptuels sociaux

En plus de son environnement naturel, l'homme s'est référé, dans la conception de son habitation, à son environnement social. Celui-ci peut être défini comme l'ensemble de la communauté dans laquelle évolue l'homme, et également à moindre échelle, sa famille, ainsi que les types de relations qu'il entretient avec elles. C'est aussi la hiérarchisation sociale, les relations familiales qui relient les différents membres de la famille, et le système économique, qu'adopte cette société pour subvenir à ses besoins. Tous ces éléments là ont guidé l'homme, dans sa conception de son habitat (Meliouh F, 2001). La vie sociale est peut être appréhendée sous des aspects principaux: stratification sociale, organisation sociale élargie, organisation sociale restreinte, mythes et croyances. L'articulation de ces aspects est assurée par des systèmes de relations, qui se traduisent dans l'habitat aussi bien directement que par leurs interactions et leurs oppositions.

2.3. 2.1.Stratifications sociales

Les stratifications sociales sont les manifestations des différenciations apparaissant dans les sociétés. Ces différenciations sont multiples, selon le type de société considéré. Mais elles traduisent tous les clivages fondamentaux entre dominants et subordonnées, exprimés par la hiérarchie, et issus du pouvoir. Le pouvoir, l'influence, le prestige résultent de conditions telles que: rapport aux ancêtres, détention de la terre et richesse matérielle, contrôle d'hommes opposables aux ennemis, manipulation du symbole et des rituels, valeurs symbolique de la fonction. Les stratifications sociales s'expriment aussi bien dans la ségrégation hommes-femmes, dans la subordination parents-enfants, dans la division en classes d'âge, par le statut matrimonial, que par le système des castes, l'existence de classes sociales, qu'elles soient régies par la naissance, la richesse, le pouvoir politique ou la fonction sociale. Elles peuvent influencer la localisation, la forme ou la mise en œuvre de l'habitation (figure 2.4).

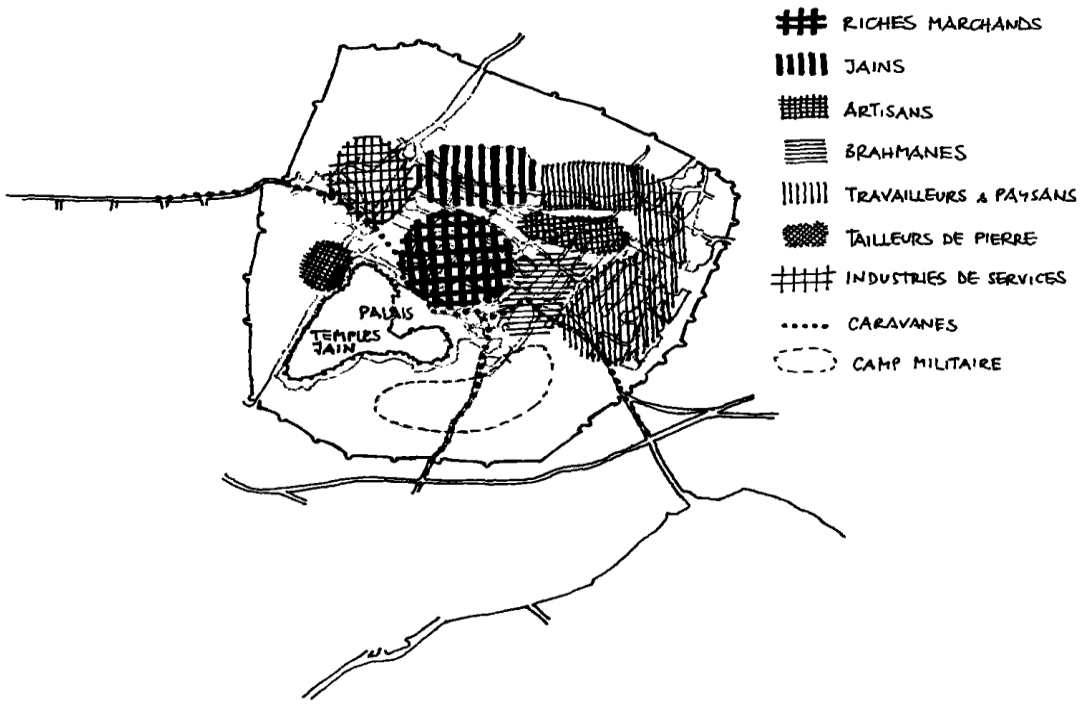


Figure 2.4: Répartition des classes sociales dans la ville de Jaisalmer-Inde (Viaro M A et al., 1983).

2.3. 2.2. Organisation sociale élargie

L'organisation sociale élargie s'applique à un groupe dans un territoire donné, et en exprime la vision du monde. Elle implique des règles de comportement traduisant les stratifications sociales, et elle permet et suscite la communication et la sociabilité. Elle fonctionne par les instruments dont le groupe se dote pour organiser sa vie collective, et qui doivent permettre d'assurer la coopération interne et la défense contre l'extérieur, le traitement des affaires publiques et judiciaires, en bref toutes les actions ayant pour but de perpétuer la société d'en affirmer le caractère sociale.

L'organisation sociale élargie se traduit dans le territoire par la présence de bâtiments publics, d'espaces communautaires, et par l'implantation de l'habitat en relation avec la structure de la société (figure 2.5).

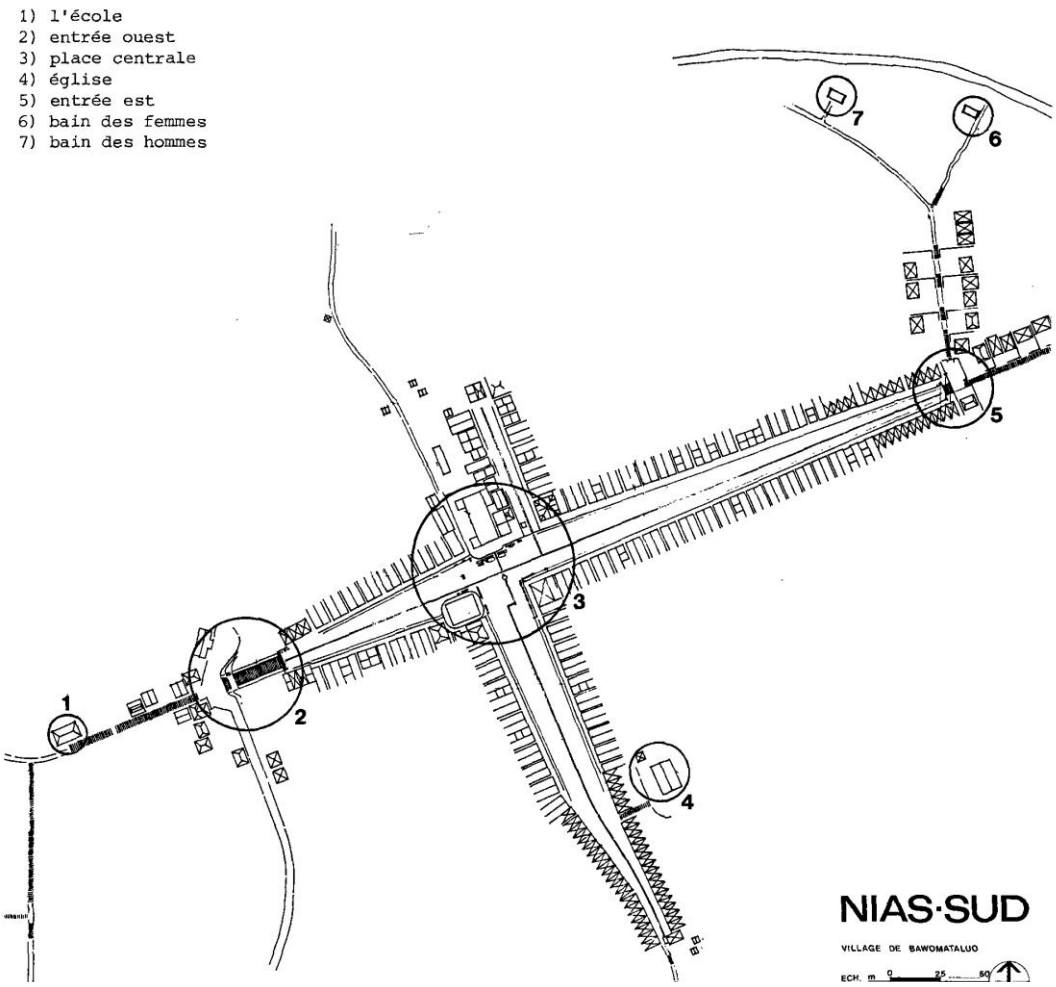


Figure 2.5: Organisation sociale dans les villages du sud de Nias- Indonésie (Viaro M.A et al, 1983).

2.3.2.3. Organisation sociale restreinte

Si les organisations de parenté peuvent être extrêmement complexes dans bien des sociétés, nous n'en traiterons que les aspects qui se traduisent dans l'organisations physiques des établissements humains et de l'habitation. Dans cette optique, en tenant compte que la résidence en commun et le coopération économique sont des facteurs obligatoires, on peut opérer les différenciations suivantes:

-unité restreinte nucléare ou polygamme (figure 2.6)

-unité élargie regroupement de plusieurs unités restrreintes (figure 2.7)

L'utilisation des espaces de l'habitat est fonction des notions de rencontre et d'intimité, de la hiérarchie familiale, de la défense, des modes de perception de l'espace, etc., propres chaque société.

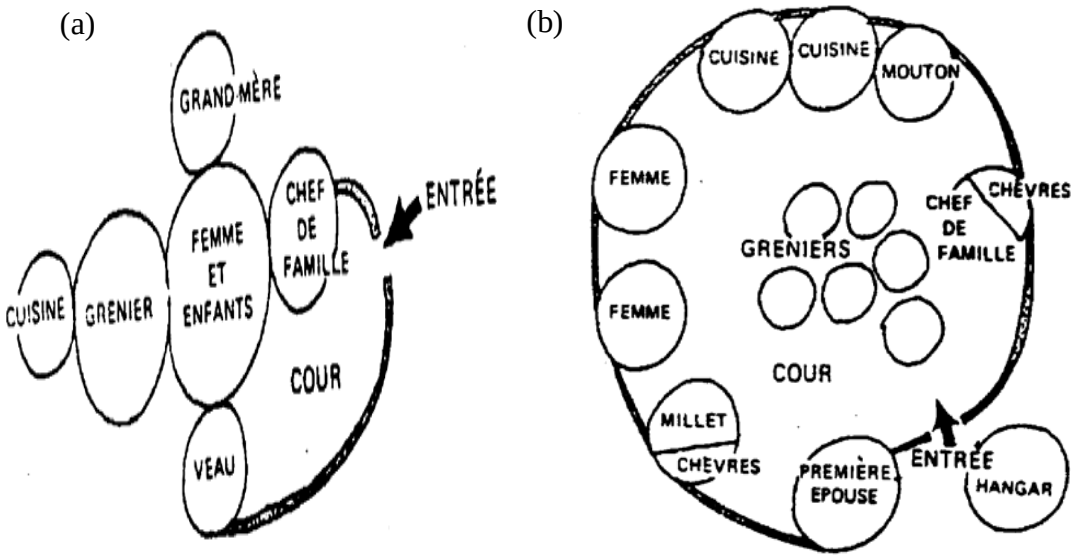


Figure 2.6: Organisation spatiales de deux habitations de forme restreinte ((a) Famille monogame (Ferme Mofou au Cameroun), (b) Famille polygame (Ferme Moundang an Cameroun)) (Meliouh F, 2001).

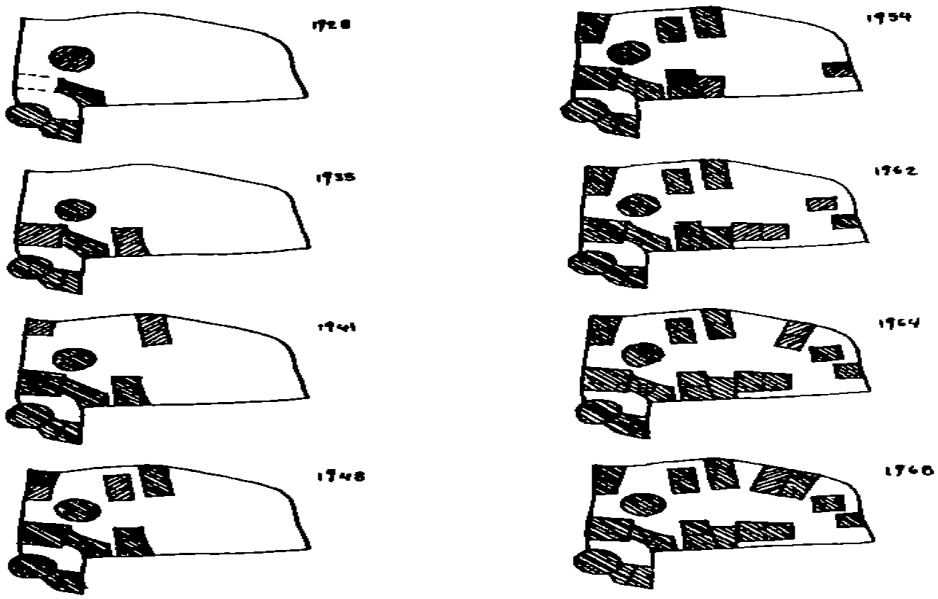


Figure 2.7: Evolution et organisation spatiales d'une habitation de forme élargie regroupement plusieurs unités (habitat Houssa- nord du Nigeria).

2.3.3. Repères conceptuels culturels

La culture a été de tous les temps une dimension incontournable dans la vie de l'homme et y a joué un rôle déterminant. Ceci s'est manifesté, en premier lieu, à travers son influence dans

sa conception de son cadre de vie. La culture est définie comme l'ensemble des idées, des institutions et des activités ayant pris force de convention pour un peuple, etc. La conception organisée du Sur-moi, la manière caractéristique dont un peuple considère le monde, et le type de personnalité d'un peuple, le genre d'être humain qui apparaît en général dans cette société. C'est à travers ces éléments là, que l'homme a développé une nouvelle dimension dans sa vie qui "contraste" avec son environnement naturel concret, et qui le caractérise en tant qu'individu dans sa communauté, ainsi que sa communauté par rapport aux autres. En le dotant d'une identité unique, cette dimension a toujours joué, dans la vie de l'homme, un rôle déterminant sur tous les plans, et en premier lieu sa façon de concevoir son cadre de vie qu'est son habitation : "car la maison est une institution crée dans toute une série d'intentions, et n'est pas simplement une structure. Comme la maison est un phénomène culturel, sa forme et son aménagement sont fortement influencés par le milieu culturel à la quelle elle appartient. En effet, dès sa première existence, l'homme s'est créé une multitude de repères culturels, auxquels il se référait et qu'il transmettait, à ses descendants par endoctrinement. Ainsi l'habitation des populations primitives a souvent reproduit l'image cosmique que se faisait l'homme, du monde qui l'entoure, elle a aussi interprété une symbolique organique et corporelle, sous différentes formes. La religion a, également, très souvent, servi, de repère conceptuel pour l'habitation, telle que dans le choix de son orientation (même si ce choix est irrationnel par rapport à d'autres critères), son degrés d'ouverture sur l'extérieur, l'exigence d'une distinction des espaces sacrés, ... etc. Les traditions ont tout autant joué un rôle important dans la conception de l'habitation en lui dictant des règles à ne pas enfreindre. Ce ne sont pas là ses seules références culturelles mais plutôt les plus persistantes, et il suffit de se référé au contexte social traditionnel local, comme exemple (qui n'est certainement pas l'unique, mais plutôt le plus accessible), pour constater l'impact de ces références culturelles sur la conception de l'habitation, où la question de l'intimité est déterminante de part les prescriptions de la religion, consacrant l'inviolabilité de la vie privée, ne serait ce que par le regard. Ceci a engendré une hiérarchisation très rigoureuse des espaces, du public au privé, d'abord à l'échelle des tissus urbains, tel que l'illustre la figure 2.9, en distinguant le passage de l'espace le plus public comme les places et les rues aux ruelles et finalement aux impasses aboutissant aux habitations, l'espace le plus privé de l'habitat, à l'échelle urbaine. Ensuite cette hiérarchisation continue à gérer la structuration de l'habitat à l'échelle de la cellule elle-même, (figure 2.8) où les espaces extérieurs et intérieurs sont séparés par un espace de transition et où les espaces intimes tels quel es chambres sont les plus éloignés. Un autre concept a beaucoup influencé la forme de l'habitation, c'est celui de l'égalité qui devrait être appliquée à

toutes les échelles, au niveau du voisinage cela a engendré une sobriété uniforme des façades des habitations, ne permettant aucune distinction entre l'habitation du riche et celle du pauvre malgré la grande différence de leur intérieur. Se limiter à ces exemples là, n'exclue pas l'existence d'une infinité de repères culturels qu'adopte l'homme dans la conception de son l'habitation, et qui varient en fonction du contexte culturel, et ses différentes sources d'inspiration (Viaro A, 1983).

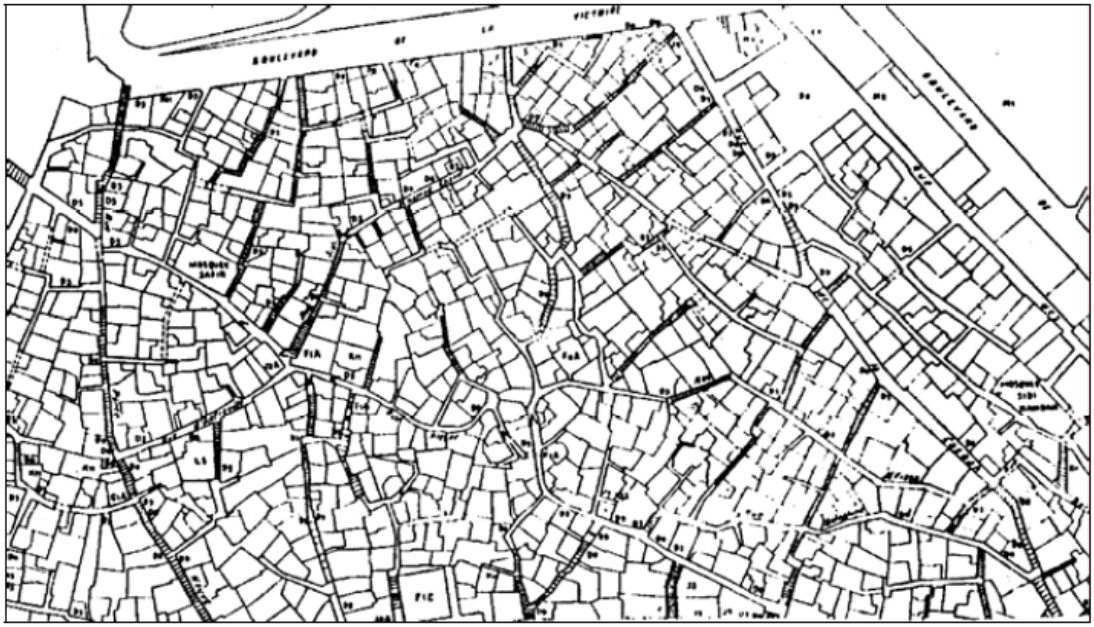


Figure 2.8: Hiérarchisation des espaces extérieurs dans un tissu traditionnel**.**

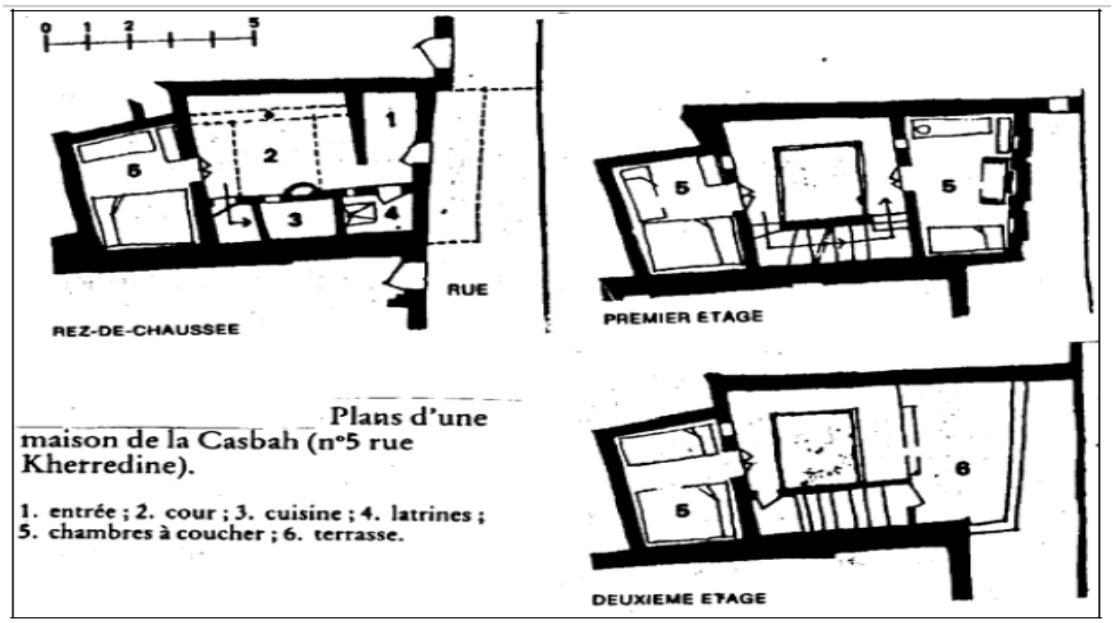


Figure 2.9: Hiérarchisation des espaces intérieurs d'une habitation traditionnelle (Viaro A, 1983).

2.4. Confort thermique

2.4.1. Notion de confort

La notion de confort est complexe, elle implique une interaction entre différents éléments : «Etat plaisant d'harmonie physiologique, psychologique et physique entre un être humain et un environnement». La sensation de confort résulte d'échanges entre l'homme et son environnement, mais elle est aussi fonction de paramètres subjectifs et affectifs.

Les ambiances résultent ainsi de la perception et de l'interprétation humaine de l'état physique de l'environnement dans lequel il se trouve.

En résumé, le confort désigne à la fois un état psychophysiologique favorable à l'épanouissement d'un être humain mais aussi un ensemble de dispositifs, d'équipements et de commodités qui répondent à l'attente d'une population donnée. Le confort à l'intérieur des bâtiments est la synthèse de perceptions multiples (lumineuse, thermique, olfactive, sonore) qui répondent à la fois aux exigences physiologiques et aux aspects d'usage et de culture (Boulet S, 2010).

2.4.2. Confort dans l'habitat

La notion de confort dans les habitats est une problématique majeure pour résoudre des problèmes écologiques (consommation et émissions des bâtiments), économiques (réduction de coûts d'exploitation) et sociaux (maintien et assistance à domicile) qui définissent le développement durable. Cependant, cette notion de confort est complexe, par le nombre de paramètres qu'elle intègre, paramètres à la fois humains (perception) et physiques (mesure). Concevoir des bâtiments respectueux du confort et du bien-être de chacun tout en diminuant sérieusement l'énergie utilisée est le défi lancé à tous les acteurs de la filière de la construction. L'un des rôles de l'habitat est de minimiser ces échanges, c'est-à-dire de protéger le corps humain contre les agressions du climat. Notre étude vise à modéliser cette notion de confort dans un contexte d'habitat à énergie positive.

2.4.3. Confort thermique

Le concept de confort thermique peut être caractérisé, pour un individu donné, par l'état de satisfaction avec les conditions d'environnement thermique. Cette satisfaction est traduite par

l'impossibilité pour le sujet de préciser s'il préfère un environnement plus "froid" ou plus "chaud". Bien sûr, les gens sont différents biologiquement et physiquement, et si des individus se trouvent soumis aux mêmes conditions thermiques, dans une même pièce, il n'est normalement pas possible de les satisfaire tous en même temps. Toutefois, on peut créer un climat optimal dans une pièce, c'est-à-dire des conditions dans lesquelles le pourcentage maximal d'individus est dans un état de confort thermique (Boulet S, 2010).

Les paramètres les plus importants qui participent au bilan thermique de l'homme et caractérisent l'état de confort thermique sont:

- Le niveau d'activité du sujet (correspondant à une production interne de chaleur dans le corps),
- La résistance thermique des vêtements,
- La température de l'air,
- La température moyenne radiante,
- Le degré hygrométrique de l'air.

2.4.4. Bilan thermique

Globalement, on peut écrire le bilan énergétique entre l'homme et son environnement de la manière suivante, en comptabilisant les contributions de la production interne de la chaleur, des échanges rayonnants, convectifs, conductifs, évaporatoires et respiratoires (figure 2.10).

$$S = H + E_{RAD} + E_{CONV} + E_{COND} + E_{SW} + E_{DIF} + E_{RES} + C_{RES} \qquad 2.1$$

H Production de chaleur interne (surfacique) (W/m^2)

E_{RAD} Echanges par rayonnement (W/m^2)

E_{CONV} Echanges par convection (W/m^2)

E_{COND} Echanges par conduction (W/m^2)

E_{SW} Echanges par évaporation de la sueur (W/m^2)

E_{DIF} Echanges par diffusion de la vapeur d'eau (W/m^2)

E_{RES} Echanges par évaporation respiratoire (W/m^2)

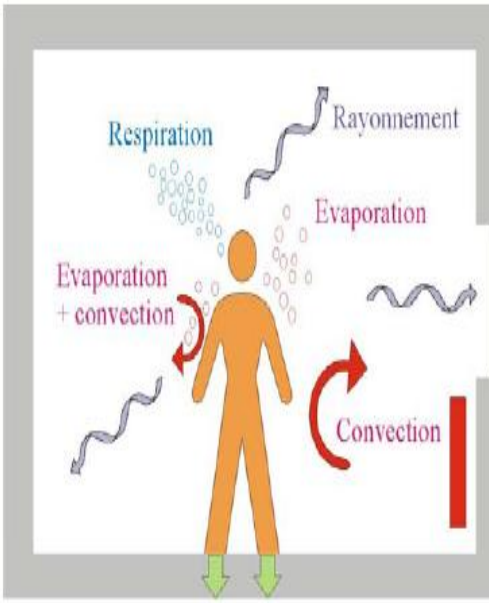
C_{RES} Echanges par convection respiratoire (respiration sèche) (W/m^2)

S Stockage dans l'organisme (W/m^2)

L'homme est un être homéotherme et dispose d'une stratégie métabolique efficace lui permettant de déclencher tout un processus de régulation qui facilite son adaptation à

l'environnement. Pour que l'homme soit dans un état de confort thermique, il faut que le débit de stockage dans l'organisme soit nul : autrement dit, qu'il puisse évacuer l'énergie produite par son mouvement métabolique (Deval J.C, 1984).

$$S = 0 \qquad 2.2$$



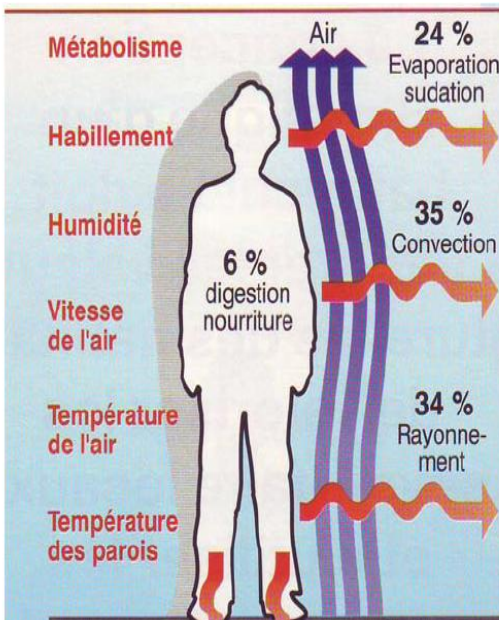


Figure 2.10: Echanges thermiques du corps humain (Certu, 2003).

2.4.5. Echanges thermiques avec l'environnement

L'homme produit et échange de la chaleur avec son environnement via cutanés et respiratoires. La production de chaleur métabolique dans le corps peut être mise à profit d'une évaluation de la température interne, ou bien être dissipée à l'extérieur. Ces échanges thermiques suivent cinq modes différents qui sont; la conduction, la convection, le rayonnement, l'évaporation et la respiration.

2.4.5.1. Echange thermique par conduction

Les échanges par conduction sont souvent négligés comme les zones corporelles concernées sont petites, et quand des parties plus grandes de la surface corporelle sont en contact avec des éléments de mobilier (murs, sols, chaise, fauteuil, canapé, lit, etc.) les tissus en contact se mettent rapidement en équilibre et se comportent comme un isolant thermique par rapport à l'ambiance. Les éléments de mobilier sont souvent représentés par une valeur additionnelle sur l'isolation vestimentaire (Moujalled B, 2007).

2.4.5.2. Echange thermique par convection

La convection correspond aux échanges de chaleur entre le corps et l'air entourant. Elle dépend de la différence entre la température de l'air et celle de la surface exposée, peau ou vêtement, en cas de convection naturelle. Si l'air est plus froid, le corps se refroidit par le mouvement de l'air qui se réchauffe au contact du corps et s'élève pour former un contour de panache au dessus de la tête avant d'être dissipé dans l'environnement. Le mouvement de l'air peut aussi être imposé en cas de convection forcée ou mixte. En plus, il faut prendre en compte le mouvement relatif de l'air par rapport au corps en cas de certaines activités (marche, course, etc.) qui s'ajoute au mouvement effectif de l'air. Quand l'air est plus chaud que la surface en contact, la convection résulte par un réchauffement du corps. L'échange convectif dépend de la différence entre la température d'air et celle du corps, peau ou vêtement, et du mouvement de l'air autour du corps (Moujalled B, 2007).

2.4.5.3. Echange thermique par rayonnement

L'échange radiatif est le mode d'échange de chaleur à distance entre deux corps par ondes électromagnétiques. On distingue deux catégories selon la bande d'émission : les échanges courts longueurs d'onde (rayonnement solaire) non pris en compte dans les bâtiments, et les échanges grandes longueurs d'onde (rayonnement infrarouge) avec les parois qui entourent le sujet. A la température ambiante (300 K), toutes les surfaces émettent des radiations principalement dans l'infrarouge dont la puissance est proportionnelle à la quatrième puissance de la température absolue de la surface. Ainsi, le corps humain émet en permanence une chaleur radiative liée à sa température cutanée et son émissivité, de même que les parois qui l'entourent. Le flux radiatif échangé par le corps correspond à la différence entre le rayonnement émis par celui-ci et le rayonnement reçu de son environnement. Si le rayonnement reçu par le corps est supérieur à sa propre émission, le corps se réchauffe, et se refroidit dans le cas inverse (Moujalled B, 2007).

2.4.5.4. Echange thermique par évaporation

Lorsque la température de la peau dépasse 35 °C, le corps se couvre de sueur dans le but d'augmenter la déperdition de chaleur par évaporation rapide de l'humidité.

Ce phénomène représente 20% de l'échange du corps humain. Il peut aider à maintenir un certain degré de confort satisfaisant dans les climats chauds et arides (Leroux F, 2005).

2.4.5.5. Echange thermique par respiration

Pendant la respiration, le corps échange de la chaleur, par convection et évaporation, avec l'air inhalé. A la sortie des poumons, l'air expiré est à une température proche de la température interne du corps, et il est presque saturé. La respiration s'accompagne ainsi d'un transfert de chaleur et de masse. Ces échanges dépendent des différences de température et d'humidité entre l'air expiré et l'air ambiant, et du débit ventilatoire (Moujalled B, 2007).

2.5. Evaluation du confort thermique

Diverses méthodes ont été entamées pour connaître les limites du confort thermique sous forme des indices et diagrammes bioclimatiques. Parmi ces méthodes, on peut citer:

- méthode de la température résultante.
- méthode de Mahoney
- méthode de l'indice de contrainte thermique.
- méthodes des diagrammes bioclimatiques de B.Givoni, V. Olgyay, S.Zokolay…etc.
- méthode des indices PMV et PPD

Nous essayons de présenter, ci après, quelques méthodes d'évaluation du confort

2.5.1. Méthode de diagramme bioclimatique de Givoni

En 1978 B. Givoni a élaboré une méthode expérimentale où il représente les limites des ambiances confortables sur un diagramme psychrométrique (figure 2.11). La zone de confort est positionnée au centre, entre les températures 20 et 26°C. L'aire extérieure à cette zone est subdivisée en zones secondaires, où il propose des procédures permettant de réintégrer les conditions de confort (Ouled Henia A, 2003).

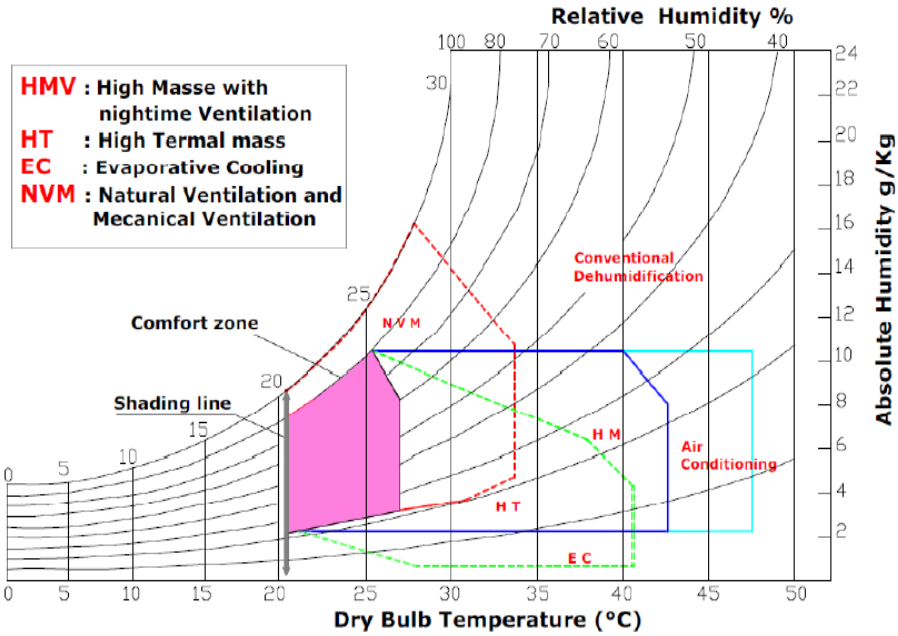


Figure 2.11: Diagramme bioclimatique de Givoni (Saifi N, 2015).

2.5.2. Méthode des indices PMV et PPD

Le Vote Moyen Prévisible (PMV) et le Pourcentage Prévisible d'Insatisfaction (PPD) sont des indices qui permettent de vérifier si un environnement thermique donné entraine un confort pour un grand nombre de gens situés dans le même environnement.

Dans les années soixante-dix, La norme ISO-7730 propose les indices PMV et PPD comme moyen d'analyser et d'évaluer l'ambiance thermique en vue de déterminer les conditions de confort thermique, avec quatre variables d'ambiance (température de l'air, température radiante, vitesse de l'air et humidité relative).Cette méthode est la plus largement utilisée pour l'évaluation du confort thermique (Moujalled B, 2007).

2.6. Facteurs influant sur le confort thermique

Il existe plusieurs facteurs variables qui interviennent dans la notion de confort. Il y a ceux qui sont relatifs à l'individu et d'autres qui sont relatifs à l'ambiance climatique environnementale :

2.6.1. Facteurs liés aux conditions climatiques

2.6.1.1. Température de l'air intérieur et des parois

Ces deux grandeurs sont les premières à contrôler généralement l'intervalle de confort; elles vont de 18°C à 26°C ; cette température est appelée température de l'air ambiant.

La température radiante participe aussi au contrôle du confort par le fait qu'une paroi mal isolée présente souvent une température radiante inférieure à la température sèche.

Cette différence peut générer une sensation d'inconfort, l'inertie thermique, l'isolation et surtout la capacité thermique des matériaux sont des outils de contrôle de la température pour l'amélioration du confort thermique.

L'intégration des matériaux à changement de phase (MCP) dans les bâtiments est un moyen intéressant pour réduire les consommations énergétiques ou pour améliorer le confort en été au sein des bâtiments.

2.6.1.2. Humidité de l'air

L'humidité de l'air n'a pas un grand effet sur la sensation de confort thermique, si les températures de l'air sont confortables ; Sauf si elle est extrêmement haute ou extrêmement basse. Il est admis des variations de l'humidité relative entre 19 à 65 %.

L'humidité de l'air peut être exprimée comme sa pression de vapeur d'eau, l'humidité de l'air à l'intérieur des bâtiments influence le corps humain de façon directe et indirecte, pouvant provoquer l'inconfort, la sensation de chaleur et de sécheresse des muqueuses des voies respiratoires (Ministère de l'habitat, 1993).

2.6.1.3. Vent

La vitesse de l'air influence les échanges par convection et par évaporation. En effet, les échanges convectifs entre la surface extérieure des parois et l'air extérieur sont fonction de la vitesse de l'air au voisinage des parois. Le taux de renouvellement de l'air dans un local dépend lui aussi de la vitesse du vent en particulier quand une ventilation transversale est possible. Cependant, dans ce cas, les occupants tentent de régler les ouvertures de façon à éviter les courants d'air (Saifi N, 2015).

2.6.1.4. Radiation solaire

La radiation solaire influe sur le confort thermique par l'augmentation de la température des surfaces ensoleillées.

En hiver, cette quantité de radiation solaire qui est le résultat de la radiation directe, diffuse et réfléchie est appréciée, à l'inverse de l'été, les surfaces ensoleillées présentant une source d'inconfort par le fait de l'augmentation des températures radiantes des parois et de la toiture. Ceci augmente par conséquence la température de l'ambiance intérieure et la rend insupportable.

2.6.2. Facteurs liés à la conception

2.6.2.1. Orientation

L'orientation d'un bâtiment est la direction vers laquelle sont tournées ses façades. C'est -à-dire la direction perpendiculaire à l'axe des blocs.

L'orientation se rapporte à l'angle d'azimut d'une surface à Nord vrai relatif; la direction générale dans laquelle une surface fait face. Tandis que l'orientation réelle est habituellement donnée en degrés du nord (à partir de l'orientation nord), elles peuvent également être données en général des directions telles que (N) du Nord, (S) du Sud, (NE) du Nord Est, (O) de L'Ouest. Comme c'est montré dans la figure 2.12.

L'orientation est la disposition d'un bâtiment ou d'un aménagement urbain par rapport aux éléments d'un site ou au point cardinal. L'orientation d'un logement est désignée par celle de sa face principale, c'est-à-dire en général celle qui comporte la plus grande surface de vitrage (Saifi N, 2015).

L'orientation d'un habitat répond à plusieurs critères: les besoins en lumière naturelle, l'intérêt d'utiliser le rayonnement solaire pour le chauffage, ou au contraire la nécessité de s'en protéger pour éviter la surchauffe, la protection du vent en hiver ou en tire profit pour le rafraîchissement d'été (les possibilités de ventilation naturelle), les vues, sont autant de paramètres importants pour le choix de l'orientation.

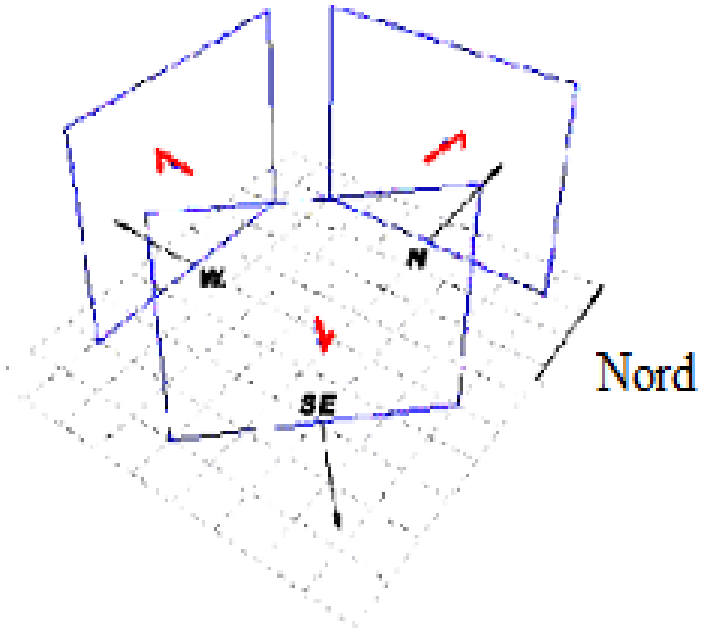


Figure 2.12: Exemple de surfaces pour différentes orientations à partir du Nord.

L'orientation des façades et des baies par rapport au soleil et au vent dominant et l'ensoleillement est la qualité de l'exposition au soleil. Conduit à choisir une disposition en fonction de données climatiques.

Dans le climat méditerranéen, où le soleil est souvent présent dans le ciel, c'est l'orientation qui définit la quantité d'énergie solaire incidente sur une paroi verticale, et cette quantité d'énergie est la principale cause de l'exigence de protection solaire. Selon une étude menée par le groupe ABC de Marseille et à partir des deux critères:

- Quantité d'énergie solaire incidente sur la paroi,
- Concomitance des moments où l'énergie incidente et la température d'air sont maximales,

Il est possible de répartir les orientations sur un cercle en quatre classes: Nord, Est, Sud et Ouest, comme le montre la figure 2.13 :

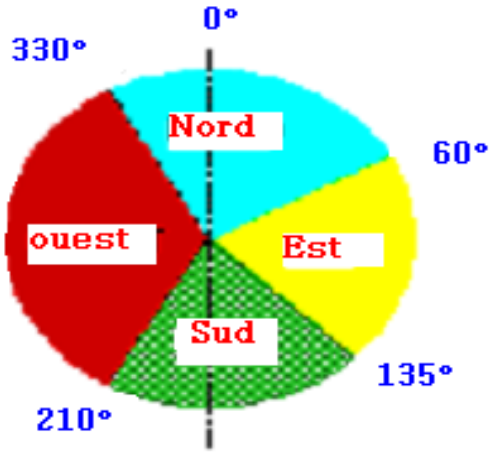


Figure 2.13: Classes d'orientations pour le climat méditerranéen en été.

L'azimut de la paroi verticale suivant l'orientation est déterminée suivant la figure 2.14, l'azimut égale à 0° pour l'orientation Sud, elle est négative à l'Est et positif à l'Ouest.

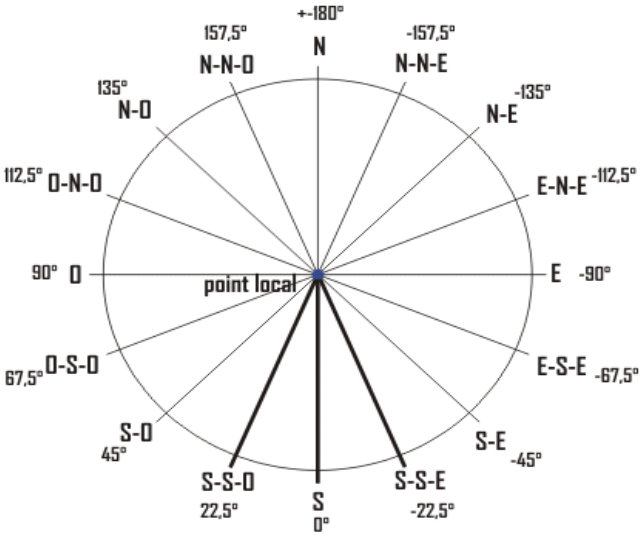


Figure 2.14 : Azimut de la paroi verticale suivant l'orientation (Ghedamsi R, 2013).

2.6.2.2. Morphologie de l'habitat

Du point de vue de la consommation d'énergie, la forme optimale pour une construction est celle qui permet un minimum de gains solaires en été et un maximum gain solaire en hiver. A ce titre, il faut souligner les performances thermiques indéniables que représentent la construction de forme compacte (elle présente un volume donné, un ratio de surface à volume réduit) et donc un minimum d'échange thermique. Les déperditions thermiques du logement se

font par le renouvellement d'air et par l'enveloppe. Une forme "compacte" est plus économe en énergie qu'une forme "éclatée", puisque les déperditions sont proportionnelles à la surface d'échange entre l'intérieur chauffé et l'extérieur froid.

Le coefficient de forme est le rapport entre la surface de l'enveloppe et le volume habitable (Ghedamsi R, 2013).

$$C_f = S_e/V \qquad 2.3$$

Où

S_e Surface de l'enveloppe (m^2)

V Volume habitable (m^3)

C_f Coefficient de forme (m^{-1})

2.6.2.3. Albédo

Albédo est le ratio de la quantité de lumière réfléchie d'un matériau par rapport à la quantité de lumière luisante sur le matériau.

Les surfaces de la paroi présentent des résistances superficielles en fonction des propriétés de convection. Outre la qualité intrinsèque de ses surfaces, les couleurs externes jouent un rôle significatif dans la modification du climat intérieur. Etant donné qu'il y a un effet sur la température externe de la surface, le choix de la couleur est très important pour la conception thermique.

En effet, la couleur extérieure a une influence sur la partie du rayonnement solaire incident absorbée par la paroi. La grandeur agissante est le facteur d'absorption (α). La valeur de α, qui varie de 0 à 1, dépend de la couleur, selon une règle simple : plus la couleur est « sombre », plus α est proche de 0.9. Une couleur claire correspond à un a égal au mieux à 0.2 (figure 2.15). Lorsque par exemple, la surface extérieure est peinte en blanc, l'absorption est basse et la réflexion est élevée.

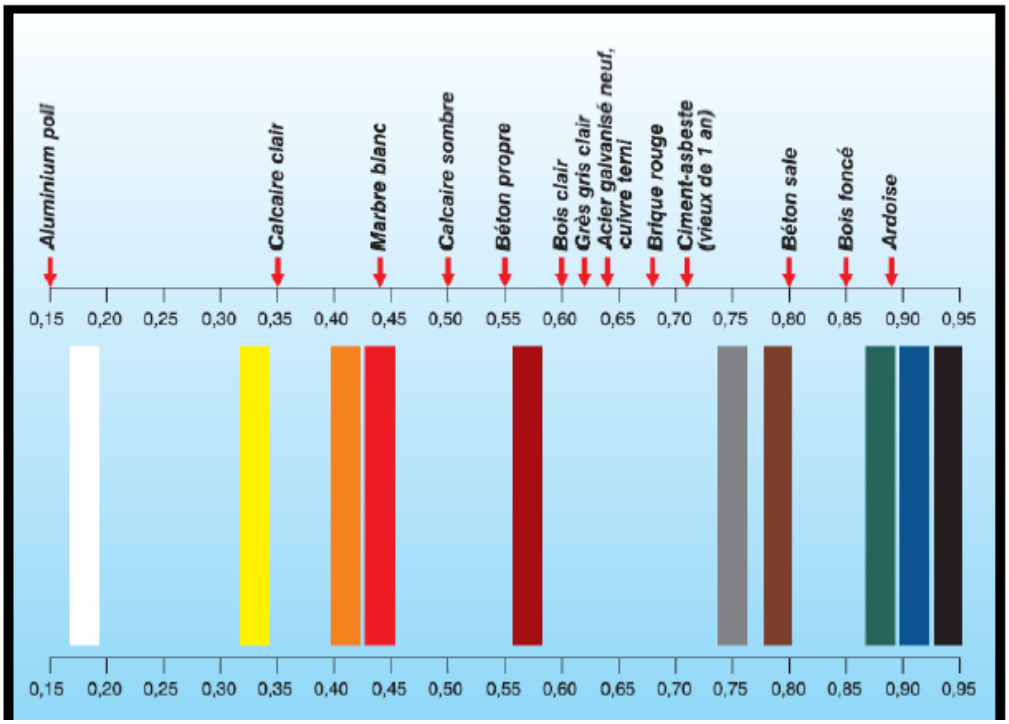


Figure 2.15: Coefficients d'absorption pour différents matériaux et différentes couleurs (Ghedamsi R, 2013).

2.6.2.4. Microclimat

Créer un microclimat autour des habitations permet d'éviter les températures extrêmes aux abords et dans ces habitations. Planter des arbres à feuilles caduques proches des façades permet ainsi de créer un ombrage l'été. La présence d'eau en mouvement participe à créer une ambiance fraîche et saine (figure 2.16).

Figure 2.16: Eau et plantation complètent la conception de l'édifice (Ghedamsi R, 2013).

2.6.2.5. Ventilation

La ventilation, en plus de renouveler l'air vicié par de l'air frais et sain, elle participe au confort thermique du corps en lui prélevant de la chaleur, par convection et évaporation de sueur. Aussi, permet-elle le refroidissement de la masse interne des bâtiments dans certaines conditions.

Le refroidissement de la masse interne intéresse les climats à forte amplitude journalière (Sahara) où, seule, une ventilation nocturne, durant les heures fraîches, peut participer au confort thermique, ainsi qu'au refroidissement des structures internes des bâtiments. Ce type de ventilation est associé à une très forte inertie des bâtiments pour les climats chauds et secs. Il faut donc, ventiler dès que l'air extérieur est plus frais que l'air intérieur, afin de prélever des calories aux murs et aux masses thermiques en général. Condition à satisfaire, cependant, les ouvertures doivent se faire face de sorte que le courant d'air ne soit pas gêné dans sa circulation.

Il va de soi que ces divers procédés ont été décomposés pour faciliter leur description, en fait, ils sont souvent, combinés entre eux. Ainsi, dans une maison, l'air des patios rafraîchi à l'eau et par la végétation pénètre dans les pièces de séjour orientées au Nord où des bassins le refroidissent plus. L'air chaud est alors repoussé en haut des pièces et s'échappe par des ouvertures situées dans la partie haute. Des variantes de ce circuit existent avec le concours de capteurs ou de tours à vent (Ghedamsi R, 2013).

2.6.2.6. Lumière

Laisser largement entrer la lumière du jour pour favoriser l'éclairage naturel**,** en veillant aux risques d'éblouissement ou de surchauffe.

2.6.2.7. Isolation thermique

L'isolation thermique introduite par les différents éléments de l'enveloppe de bâtiment constitue un important critère de performance énergétique. Elle permet de réduire les déperditions de chaleur, de réaliser des économies de chauffage, de limiter les émissions de gaz à effet de serre et de bénéficier d'un meilleur confort de vie.

Dés que deux éléments en contact possèdent des températures différentes, il se produit un échange de chaleur entre eux jusqu'à ce que leurs températures deviennent identiques. Le but de l'isolation est de freiner cet échange thermique et de permettre ainsi de garder les parois de l'habitation à une température la plus proche possible de celle de l'air intérieur **(**Sotehi N, 2011).

La répartition des déperditions dans une maison non isolée est illustrée par la figure 2.17.

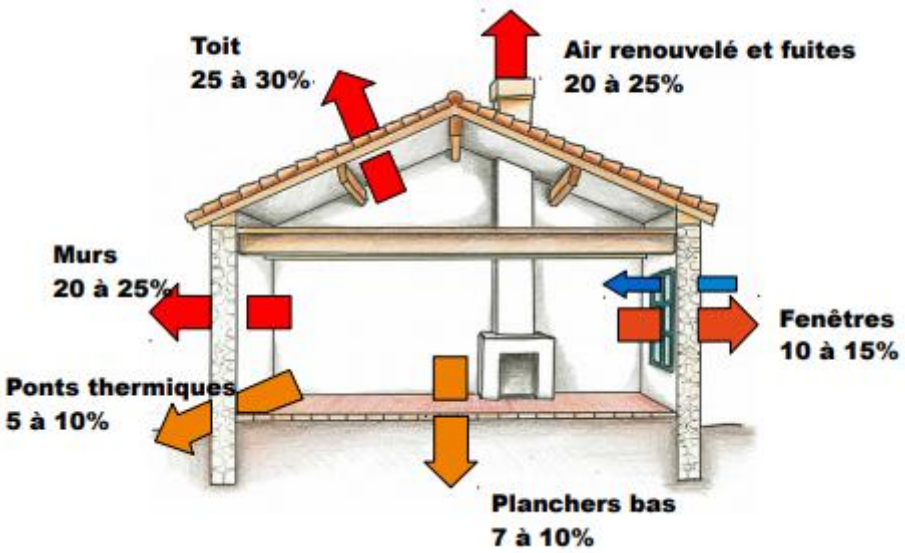


Figure 2.17: Répartition des déperditions thermiques dans une habitation **(**ADEME, 2017).

On compte approximativement des valeurs de déperditions thermiques l'ordre de :

- Toits : 25 à 30 %,
- Murs : 20 à 25 %,
- Air renouvelé et fuite : 20 à 25 %,

- Portes fenêtres : 10-15 %,
- Sols : 7-10 %,
- Ponts thermiques : 5-10 %.

Une grande partie de déperdition de chaleur se faisant par les toits et les murs, par conséquent une bonne isolation thermique des parois permet de réduire les consommations énergétiques dans les bâtiments de plus de 60% **(**Sotehi N, 2011).

Les matériaux à changement de phase sont des matériaux intelligents apparus sur le marché de la construction dans un premier temps pour réduire les besoins en climatisation durant les périodes chaudes. Les MCP s'avèrent capables d'améliorer les performances énergétiques de l'enveloppe tout en augmentant l'inertie thermique.

2.7. 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. Le stockage de chaleur latent de MCP peut être réalisé par le changement solide-solide, de solide-liquide, de solide-gaz et de phase de liquide-gaz. Cependant, le seul changement de phase utilisé pour des MCP est le changement de solide-liquide. Les changements de phase de Liquide-gaz ne sont pas pratiques pour l'usage en tant que stockage thermique dû aux grands volumes ou pressions exigés pour stocker les matériaux dans leur phase gazeuse. Les transitions de Liquide-gaz ont une chaleur plus élevée de transformation que des transitions de solide-liquide. Les changements solides-solides de phase sont en général très lents et ont plutôt une basse température de transformation (Regin A. F et al., 2008).

Le tableau qui suit résume les avantages et les inconvénients des types de changement de phase.

Tableau 2.1: Avantages et inconvénients comparés des différents changements d'état (Kissock J.K et al, 1998).

Changement de phase	Avantages	Inconvénients
Liquide/Gaz	Grande valeur de la chaleur latente	Grand changement de volume
Solide/Solide	Faible changement de volume Pas de formation de fluide	Faible valeur de la chaleur latente
Solide/Liquide	Faible changement de volume	Valeur moyenne de la chaleur latente
Solide/Gaz	Grande valeur de la chaleur latente	Grand changement de volume

Les corps avec changement d'état solide/liquide couramment utilisés dans la gamme de températures considérée peuvent entre classés selon trois catégories (figure 2.18) (Cabeza L.F et al, 2003), (Cabeza L.F et al, 2011) (Farid M.M, 2004), (Tyagi V.V et al, 2007):

- Inorganique (hydrates salins, métaux)
- Organique (paraffines, corps non-paraffiniques)
- Eutectique (mélanges de deux ou plusieurs corps qui ont des températures de fusion précises) de corps inorganiques et/ou organiques.

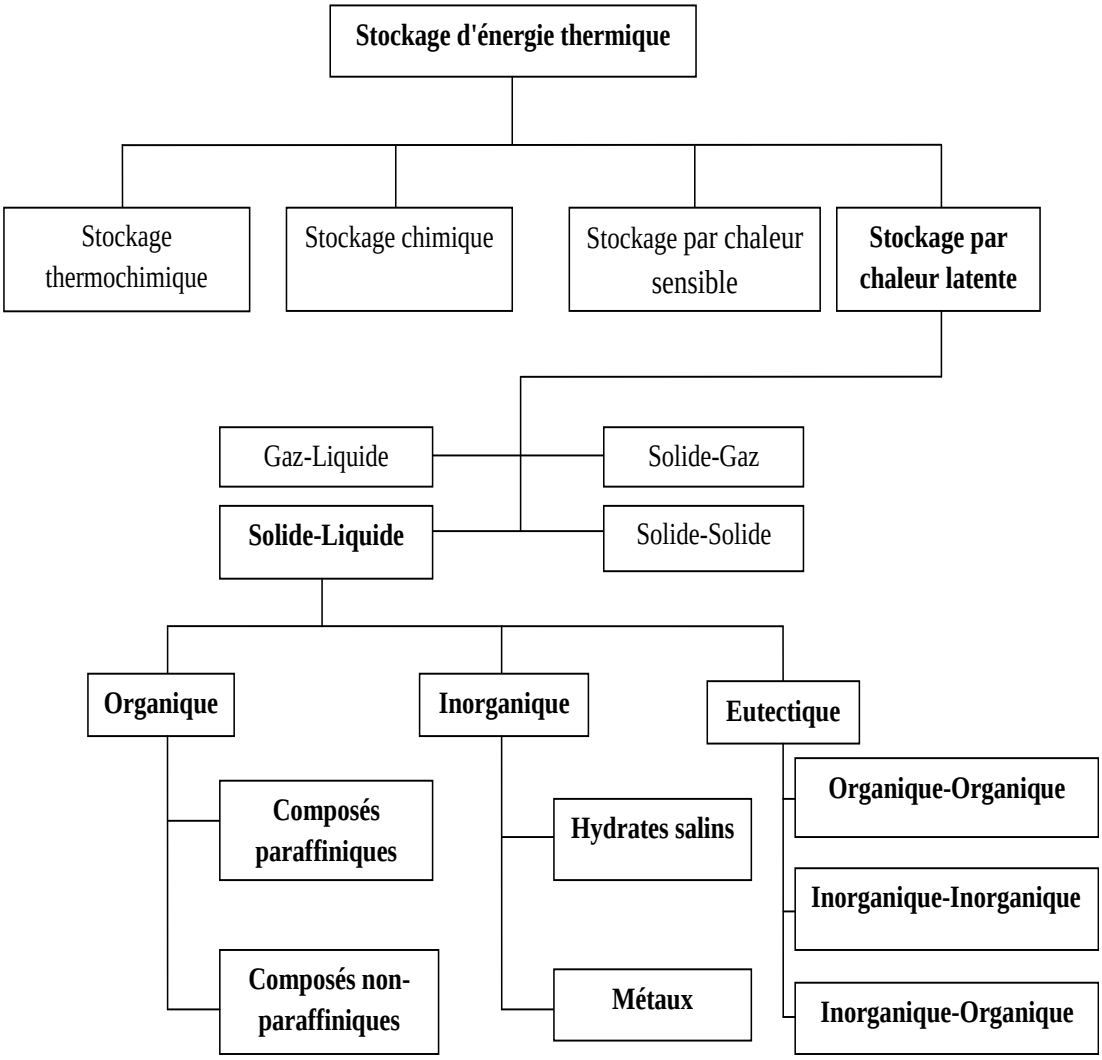


Figure 2.18: Classification des matériaux de stockage de l'énergie (Cabeza L.F et al, 2003), (Cabeza L.F et al, 2011).

2.8. Conclusion

L'ambiance thermique dans les bâtiments est un facteur important pour le confort des occupants. Actuellement, la prise en compte du confort thermique dans les bâtiments se fait avec des méthodes et des outils élaborés à partir d'approches statiques, simplifiant la complexité des phénomènes interactifs. Ainsi, les exigences constructives favorisent le surdimensionnement des équipements de contrôle et de régulation des ambiances thermiques (systèmes de chauffage et de climatisation), principales sources de consommation d'énergie et d'émission de gaz à effet de serre, dans le bâtiment.

L'enveloppe est, naturellement, le lieu privilégié des relations entre espaces intérieurs et extérieurs. Il s'agit alors, de gérer simultanément le rôle que joue la paroi du bâtiment et celui qu'elle assure comme élément de contrôle des échanges intérieurs/extérieurs. Par conséquent, ce qui est à retenir de ce chapitre, est que beaucoup de facteurs peuvent affecter l'environnement intérieur, tels que les sources de chaleur et d'humidité, la conception thermique de la structure, l'effet d'autres bâtiments, l'élément végétal, etc. qu'il faut prendre en considération. De ce fait, pour une conservation d'énergie, une protection optimale de l'environnement et un confort maximum, il est essentiel de bien maîtriser ces paramètres.

L'architecture bioclimatique insiste sur l'optimisation de la relation qui existe entre le bâtiment et le climat en vu de créer des ambiances confortables par des moyens spécifiquement architecturaux, pour exploiter les effets bénéfiques de ce climat et on offrant une protection contre ses effets négatifs.

L'architecture bioclimatique apparait comme l'une des solutions pour réduire les consommations énergétiques et donc les émissions de gaz à effet de serre, elle vient pour mieux adapter les constructions au milieu naturel et pour exploiter rationnellement les énergies renouvelables en s'inscrivant dans une démarche de durabilité.

Chapitre 3

Simulation numérique du comportement thermique des parois couplant Matériaux à Changement de Phase (MCP)

3.1. Introduction

Les charges de chauffage et de refroidissement des bâtiments sont la plupart du temps dues à la transmission de chaleur à travers l'enveloppe de bâtiment. Du point de vue d'économie d'énergie, la façon la plus efficace de réduire ces charges est de réaliser une isolation thermique à l'enveloppe de bâtiment, entre autres, en utilisant des matériaux à changement de phase.

L'efficacité des systèmes de protection des murs dépend de plusieurs paramètres tels que l'orientation, les dimensions et leur fonctionnement thermique, vis à vis du climat.

Ce chapitre est constitué de deux parties. Dans la première partie, on étudie le comportement thermique d'une paroi en plâtre contenant trois types différents de MCPs avec des concentrations variables pour mettre en évidence l'importance de la quantité et la qualité de MCP. Les objectifs préconisés dans la deuxième partie sont la détermination de la concentration optimale de l'isolation pour différentes orientations de mur sous les conditions climatiques de la ville de Ouargla. La simulation se fait à l'aide d'un code numérique écris sous langage Matlab.

3.2. Choix du matériau à changement de phase

Lorsque le mur extérieur d'un bâtiment est soumis à des fluctuations des températures ou de flux thermique, il est important que la température de la surface intérieure reste à une température la plus constante possible et proche d'une valeur conduisant à un confort optimal des occupants. Une façon d'y arriver à ce confort est d'isoler convenablement cette paroi et/ou d'utiliser des MCP micro-encapsulés dont la température de changement d'état est voisine de celle de confort. Le comportement de différents types de parois va donc être étudié par simulation numérique.

Dans ce chapitre, plusieurs types de parois seront étudiés en associant différents matériaux: plâtre, MCPs. La simulation numérique a été réalisée par un code de calcul préparé à cet effet en utilisant le logiciel Matlab. Elle repose sur la programmation de modèles mathématiques qui sont adaptés aux moyens numériques.

Le système décrit par l'équation de chaleur transitoire à été discrétisé par la méthode de différences finies (la méthode explicite).

Cette investigation vise l'évaluation d'impact de l'isolation par les matériaux à changement de phase sur le confort thermique estival des bâtiments sous le climat de Ouargla et par conséquent sur le confort des individus. L'isolation peut réguler considérablement le confort intérieur et permet ainsi d'obtenir des économies d'énergie.

3.2.1. Description du problème

Le modèle physique considéré est présenté dans la figure 3.1. Il s'agit d'une cavité d'aluminium de dimension (10x6x3 cm) avec une épaisseur de 1mm, sur la quelle on dépose une plaque de plâtre qui contient les matériaux à changement de phase. L'ensemble cavité et plaque de plâtre sont couverts d'une couche de liège de 2cm d'épaisseur afin d'assurer une isolation de système avec le milieu extérieure. La circulation de l'eau chaude dans la cavité est assurée à l'aide d'une pompe hydraulique. Ce débit d'eau apporte avec lui une chaleur calorifique qui peut être régulé avec un bain thermostatique de telle sorte que la température obtenue soit similaire à celle de la ville de Ouargla. La cavité d'aluminium équipée d'un mélangeur pour atteindre l'homogénéité de la température de l'eau.

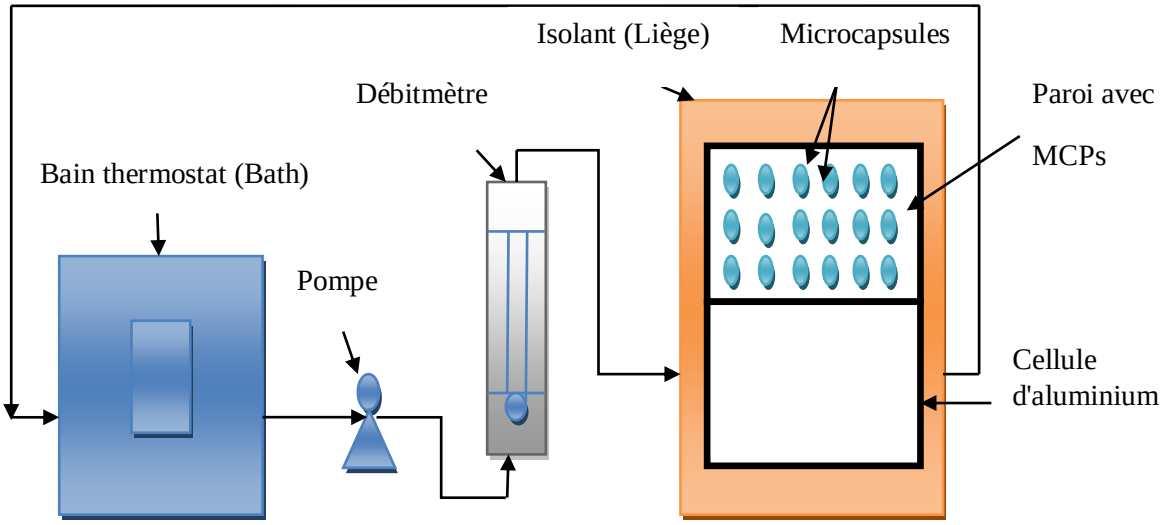


Figure 3.1: Modèle physique pour l'étude du comportement thermique des parois (Ghedamsi R et al., 2015a).

3.2.2. Modèle mathématique

Le comportement de différents types de parois va donc être étudié par simulation numérique en faisant plusieurs hypothèses (Ghedamsi R et al, 2014), (Ghedamsi R et al, 2015a).

- Les microcapsules sont homogènes et uniformément distribuées à l'intérieur du mur.
- Le taux d'encapsulation égal à 50% (masse de matière active / masse de microcapsules).
- Le volume total du mur constant.
- La contribution de la chaleur latente de MCP à la capacité de stockage du mur est établie par la variation de la capacité de chaleur spécifique apparente avec la température.
- Les conductivités thermiques et les masses volumiques des matériaux de construction sont indépendantes de la température, mais ayant des valeurs différentes pour le solide et la phase liquide. Ainsi, la masse volumique et la conductivité de MCP sont des fonctions de la fraction fondue.
- Le transfert thermique par le mur est unidimensionnel (La cavité d'aluminium équipée d'un mélangeur pour atteindre l'homogénéité de la température de l'eau.
- Le modèle mathématique est basé sur l'équation de conduction de la chaleur de Fourier. Plusieurs types de parois seront étudiés en associant différents matériaux: plâtre, MCPs. La simulation numérique sera effectuée en résolvant l'équation de conduction de la chaleur à travers ces parois avec des conditions aux limites appropriées.

$$\frac{\partial(\rho.c.T)}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x}\left(k.\frac{\partial T}{\partial x}\right) \qquad 3.1$$

x Direction de flux thermique (m)

T Température (°C)

t Temps (s)

ρ Masse volumique (kg/m^3)

c Chaleur spécifique, (J/kg°C)

k Conductivité thermique, (W/m°C)

La masse volumique et la conductivité de mur à n'importe quelle température peuvent être obtenues comme fonction des masses volumiques et des conductivités initiales des matériaux originaux, respectivement. Ils dépendent de la fraction massique fondue du MCP (W_f) à chaque température. La fraction massique fondue de MCP peut être obtenue comme suit:

$$\begin{cases} T \leq T_{Fi} & W_f = 0 & 3.2 \\ T_{Fi} < T \leq T_{FF} & W_f = \frac{\int_{T_{Fi}}^{T} C_P^{eff}\, dt}{\int_{T_{Fi}}^{T_{FF}} C_P^{eff}\, dt} & 3.3 \\ T > T_{FF} & W_f = 1 & 3.4 \end{cases}$$

T_{Fi} et T_{FF} sont les températures de point de fusion respectivement initiale et finale du MCP. Ainsi, si on suppose le volume total constant, la masse volumique de mur et la conductivité à n'importe quelle température peuvent être obtenues comme suit:

$$\rho = \sum_{i=1}^{N} \rho_i\, w_i + w_{MCP}\left(W_f \rho_{MCP}^{liq} + \left(1 - W_f\right)\rho_{MCP}^{sol}\right) \qquad 3.5$$

$$k = \sum_{i=1}^{N} k_i\, w_i + w_{MCP}\left(W_f k_{MCP}^{liq} + \left(1 - W_f\right)k_{MCP}^{sol}\right) \qquad 3.6$$

ρ_i	Masse volumique des matériaux de construction sauf le MCP (kg/m^3)
k_i	Conductivité des matériaux de construction sauf le MCP (W/m.°C)
w_i	Fraction massique des matériaux de construction sauf le MCP
w_{MCP}	Fraction massique du MCP
ρ_{MCP}^{liq}	Masse volumique du MCP en phase liquide (kg/m^3)
k_{MCP}^{liq}	Conductivité thermique du MCP en phase liquide (W/m.°C)
ρ_{MCP}^{sol}	Masse volumique du MCP en phase solide (kg/m^3)
k_{MCP}^{sol}	Conductivité thermique du MCP en phase solide (W/m.°C)
N	Nombre des matériaux de construction de mur sauf le MCP

3.2.2.1. Conditions initiales et aux limites

Les conditions initiales et aux limites reproduisant le modèle physique décrit dans la figure 3.1 s'expriment comme suit :

a) Pour la zone paroi

$$\begin{cases} t = 0 & T = T_{pi} & 3.7 \\ x = 0 & k \left.\frac{dT}{dx}\right|_{x=0} = \dot{Q} & 3.8 \\ x = \delta & k \left.\frac{dT}{dx}\right|_{x=\delta^-} = k_{\text{liège}} \left.\frac{dT}{dx}\right|_{x=\delta^+} & 3.9 \end{cases}$$

T_{pi} Température initiale de la paroi de plâtre (°C)

$\dot{Q}$ Flux de la chaleur entrant (W/m^2)

$k_{liège}$ Conductivité thermique de liège (W/m.°C)

δ Epaisseur du bloc de plâtre (m)

b) Pour la zone isolée

L'équation de conduction de la chaleur de Fourier (3.1) pour la zone liège devient:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha_{\text{liège}} \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \qquad 3.10$$

$$t = 0 \qquad T = T_i^{\text{liège}} \qquad 3.11$$

$$x = \delta + \delta_{\text{liège}} \qquad k_{\text{liège}} \frac{dT}{dx}\Big|_{x=\delta+\delta_{\text{liège}}} = h_c\,(T - T_\infty) \qquad 3.12$$

$T_i^{\text{liège}}$ Température initiale du liège, (kg/m^3)

$\alpha_{\text{liège}}$ Diffusivité thermique du liège (m^2/s)

h_c Coefficient de convection de transfèrent chaleur (W/m^2.°C)

T_∞ Température extérieur (°C)

$\delta_{\text{liège}}$ Epaisseur d'isolation (m)

Le système ci-dessus des équations a été discrétisé par la méthode des différences finies. En appliquant cette méthode numérique, on peut réduire les équations différentielles partielles (3.1) et (3.10) à un système d'équations algébriques, tenant compte des conditions aux limites.

3.2.2.2. Processus de calcul

Un programme informatique a été écrit afin de procéder à la résolution numérique du modèle direct. L'organigramme décrivant les différentes étapes du calcul est résumé ci dessus.

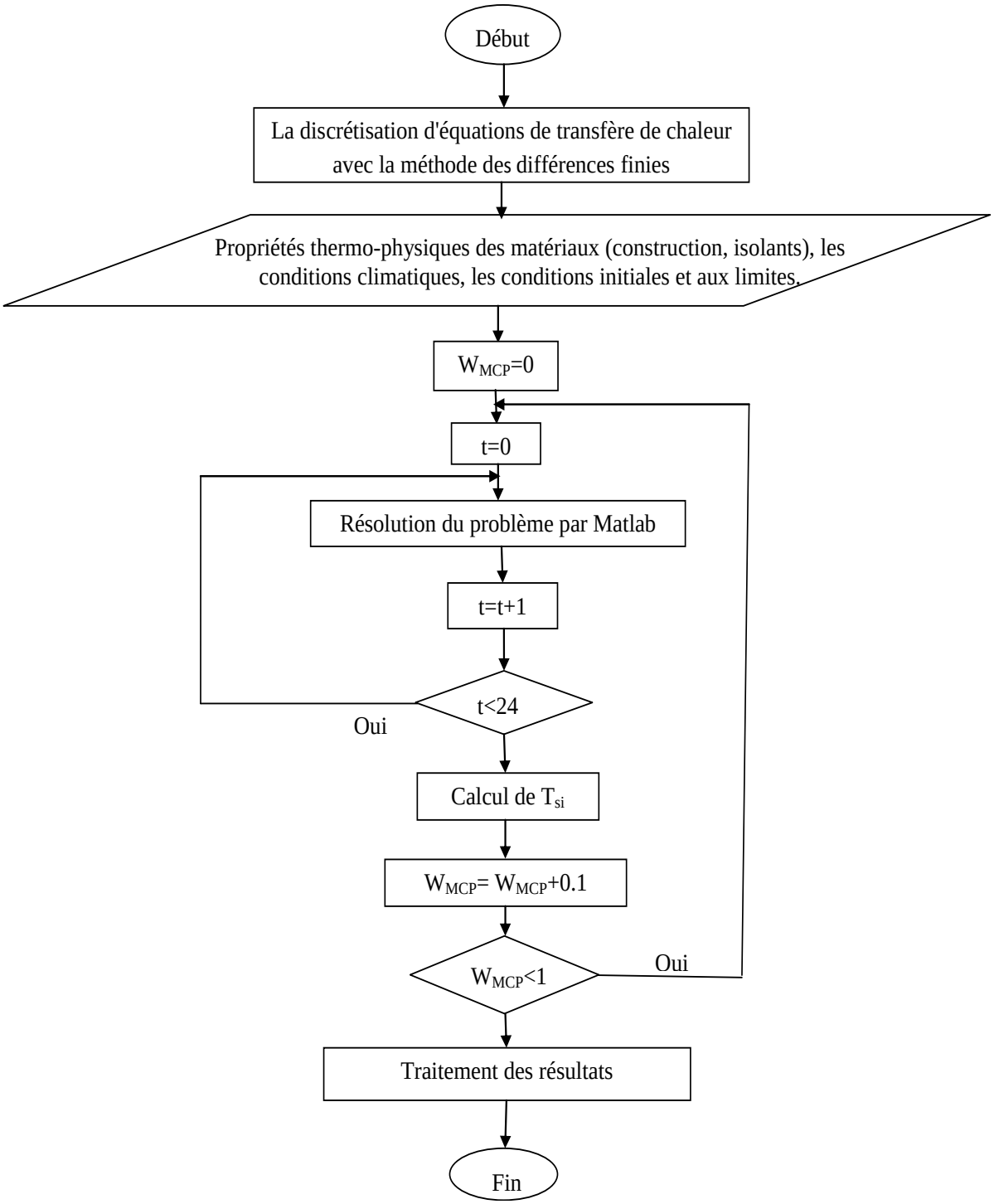


Figure 3.2: Organigramme de calcul**.**

3.2.2.3. Validation des procédures de calcul

Un calcul de simulation préliminaire a été effectué pour comparer les résultats obtenus par le présent travail et les résultats expérimentaux présentés par Borreguero (Borreguero A. M

et al, 2010). Nous avons choisi le problème du choc thermique à température imposée en surface sur un mur plan d'épaisseur 6cm. Cette température variée entre 18 et 42°C par un pas de 0.5°C. Le problème est unidimensionnel. La validation faite par un logiciel Digitizelt.

L'évolution de la température de la surface extérieure de paroi est présentée sur la figure 3.3 et le tableau 3.1.

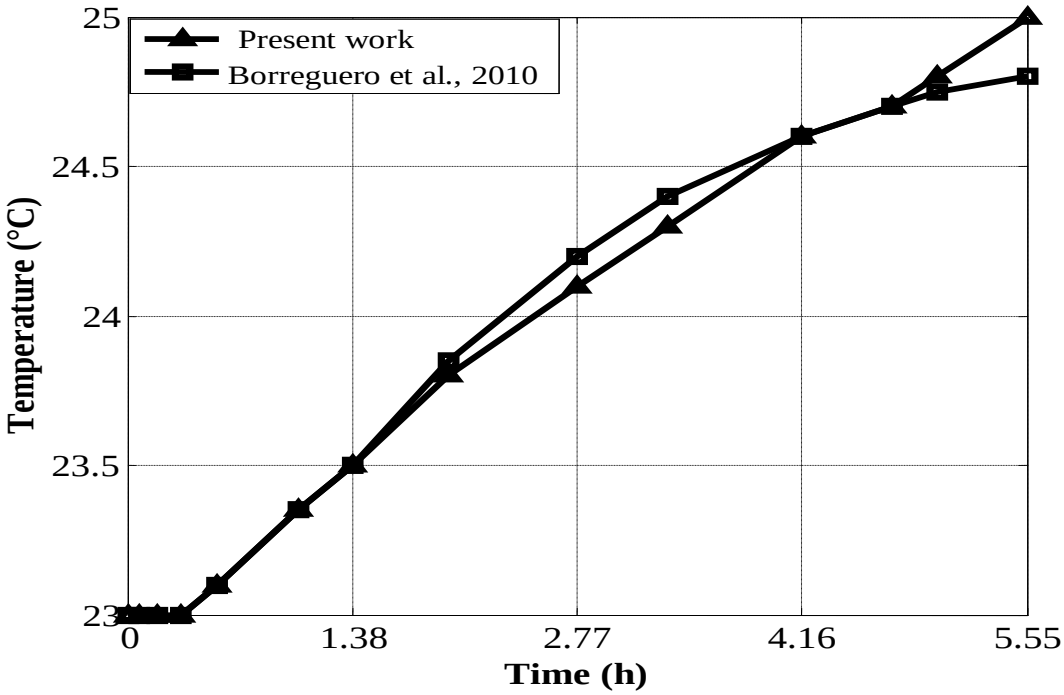


Figure 3.3: Validation du travail présent obtenu et la littérature.

Les courbes de la figure 3.3 révèlent une concordance entre la température surfacique interne simulée et celles de Borreguero.

Le tableau 3.1 montre un écart maximal entre les deux courbes de température de 0,806°C, enregistrée à 20000s. Ceci montre la validité de notre modèle.

Tableau 3.1: Comparaison des valeurs de la température et écart entre des courbes obtenues par la simulation numérique et la littérature (Borreguero A. M et al., 2010), (Ghedamsi et al, 2014).

t(s)	T(°C) (travail présent)	T (°C) (littérature)	Ecart %
0	23	23	0
248	23	23	0
661	23	23	0
1200	23	23	0
1980	23,1	23,1	0
3800	23,3	23,3	0
5000	23,5	23,5	0
7150	23,8	23,9	0,418
10000	24,1	24,2	0,413
12000	24,3	24,4	0,409
15000	24,6	24,6	0
17000	24,7	24,7	0
18000	24,8	24,7	0,404
20000	25	24,8	0,806

3.2.3. Cas étudiés

Différents types de parois ont été simulés avec ou sans matériaux à changement de phase (figure 3.4). On peut classer sous deux rubriques les cas qui ont été analysés à l'aide de la simulation :

a) Parois de plâtre sans MCPs;
b) Parois de plâtre avec MCPs.

Les trois paramètres qui sont introduits au modèle sont:

1) Le flux thermique instantané.

Nous montrons le flux thermique instantané pour un bloc froid de plâtre placé sur un plat chaud dans la figure suivante.

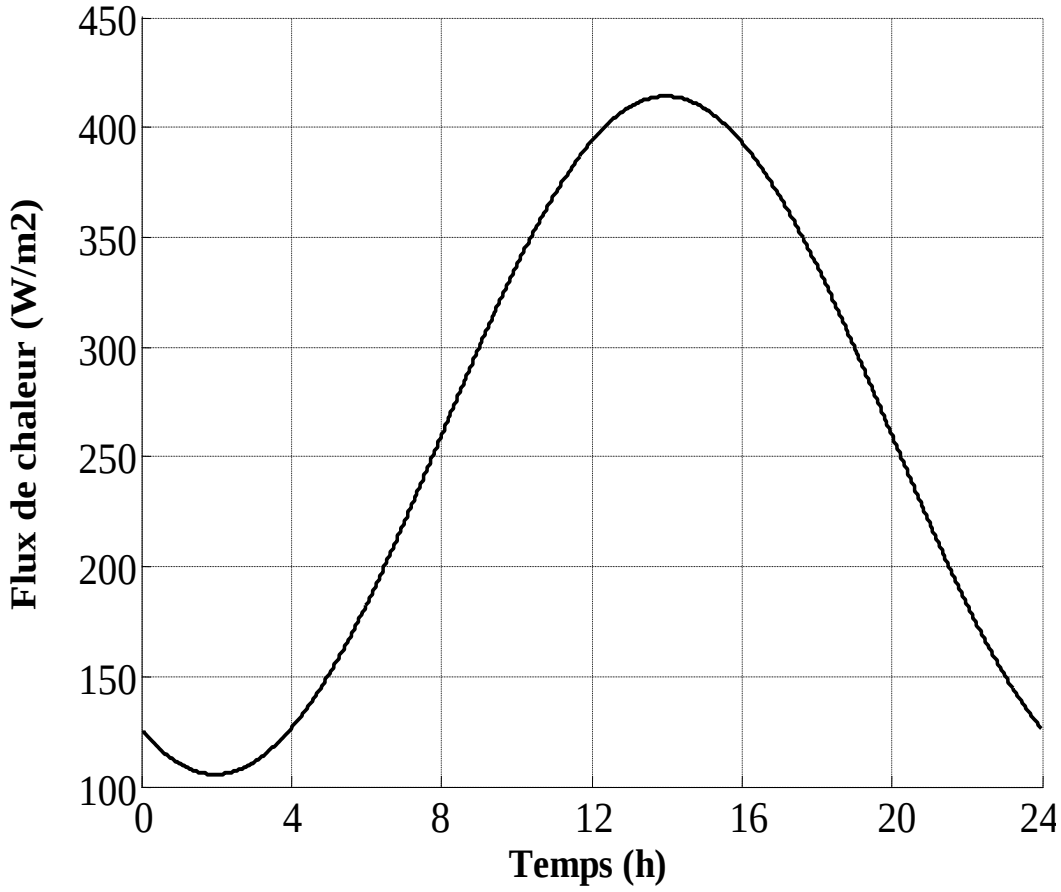


Figure 3.4. Flux de chaleur entrant de paroi en plâtre

La température extérieure variant ainsi sinusoïdalement suivant la relation:

$$T_e(t) = \frac{(T_{max}+T_{min})}{2} + \frac{(T_{max}-T_{min})}{2}\sin\big((t-8)\pi/12\big) \qquad 3.13$$

T_{max} Température maximale journalière (°C)

T_{min} Température minimale journalière (°C)

2) Température intérieure constante : $T_{ai} = 23$°C

3) La capacité de chaleur spécifique apparente avec la température.

La figure 3.5 montre la capacité de chaleur spécifique apparente pour les parois de plâtre avec différents pourcentages d'eicosane. Les courbes théoriques contenant 5%, 10% et 50% du poids des microcapsules ont été calculées comme combinaison des matériaux originaux.

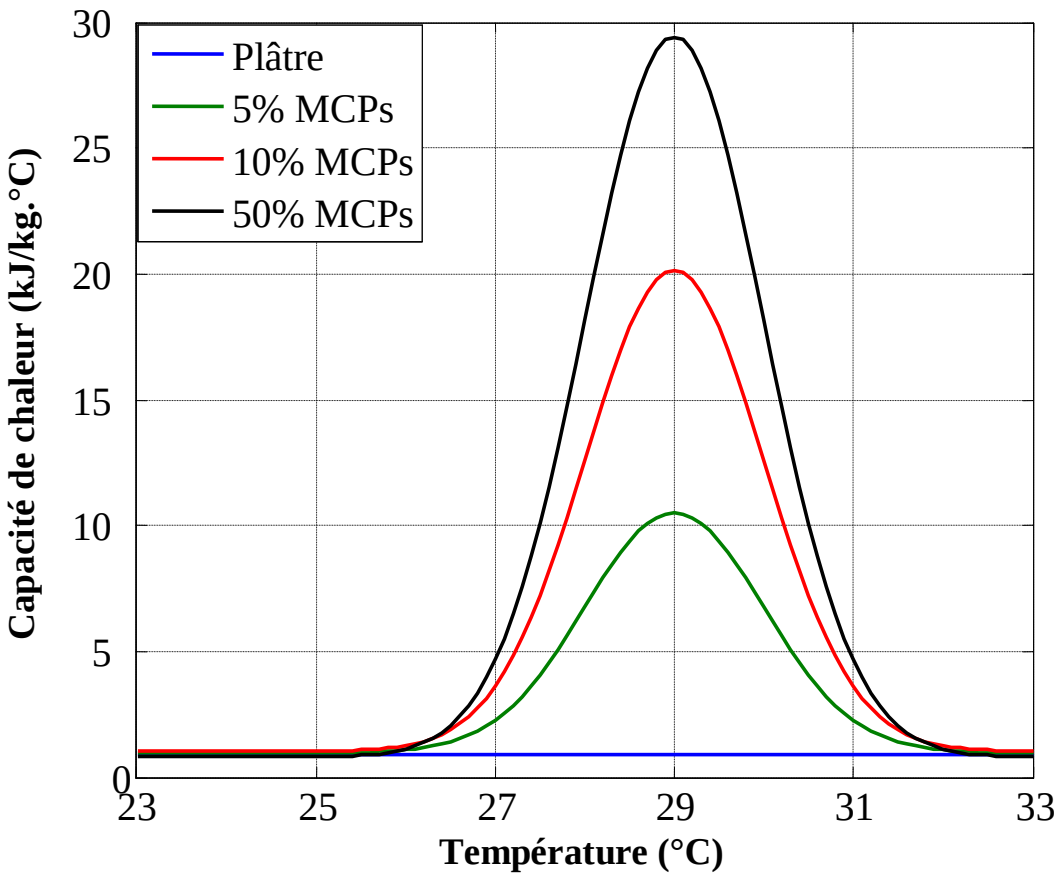


Figure 3.5: Capacité thermique apparente de parois de plâtre avec différentes concentrations (Cas $CaCl_2.6H_2O$ avec 0%, 5%, 10% et 50%).

3.2.3.1. Grandeurs analysées

La grandeur qui nous intéresse principalement est la température de la surface intérieure des parois. Ce sont donc les variations de cette grandeur qui seront analysées.

3.2.3.2. Propriétés thermophysiques des matériaux

Les parois étudiées sont constituées :

- de plâtre pur ;
- de polymère (polystyrène);
- de mélange plâtre/ MCP. Les MCP utilisés sont**:** Eicosane, $CaCl_2.6H_2O$ et $Na_2CO_3 10H_2O$.

Le tableau 3.2 donne les propriétés physiques des différents matériaux utilisés.

Tableau 3.2: Propriétés physiques des matériaux utilisés (Ghedamsi et al., 2015a).

Matériel	λ [W/m.°C]	ρ^S [kg/m^3]	ρ^l [kg/m^3]	Cp [kJ/kg.°C]	T_F (°C)	L_f (kJ/kg)
Polystyrène	0.08	1050	-	1.3	-	-
Plâtre	0.2	900	-	0.9	-	-
Eicosane	0.15	856	778	2.21	37	247
$Na_2CO_3.10H_2O$	0.544	1458	1485	2.16	32	252
$CaCl_2.6H_2O$	0.54	1802	1562	2.16	29	190.8

3.2.3.3. Variation de la température de la surface intérieure en fonction de la concentration et le type de MCP

Une paroi en plâtre contenant trois types différents de MCPs (Eicosane, $Na_2CO_3.10H_2O$ et $CaCl_2.6H_2O$) avec des concentrations variables (0%, 5%, 10%, 15% et 50%) ont été étudiées pour mettre en évidence l'importance de la quantité et la qualité de MCP.

Les figures suivantes (3.6, 3.7 et 3.8) présentes la variation de la température sur la surface intérieure d'une paroi de mélange plâtre/MCPs avec des concentrations différentes de MCPs.

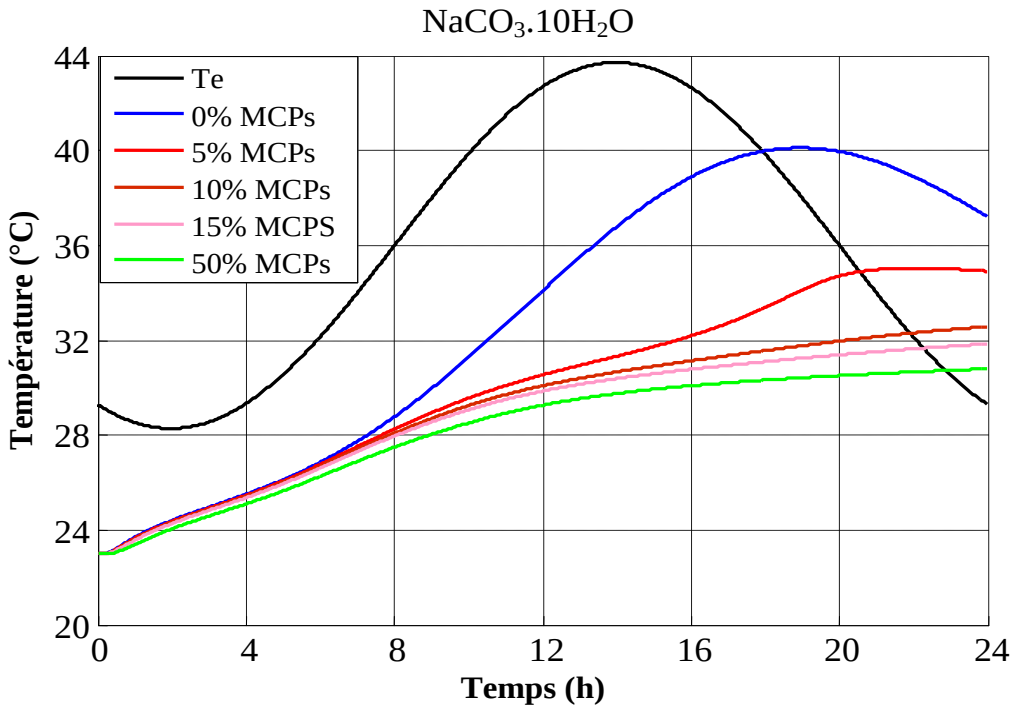


Figure 3.6: Comparaison des évolutions de la température intérieure pour des concentrations différentes (cas**:** eicosane).

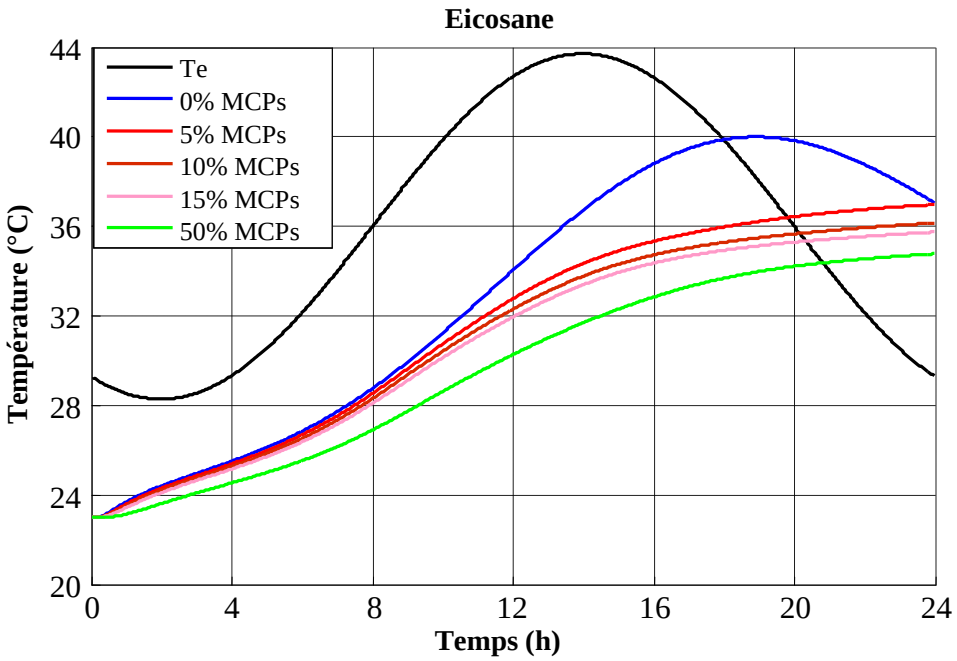


Figure 3.7. Comparaison des évolutions de la température intérieure pour des concentrations différentes (cas**:** $Na_2CO_3.10H_2O$).

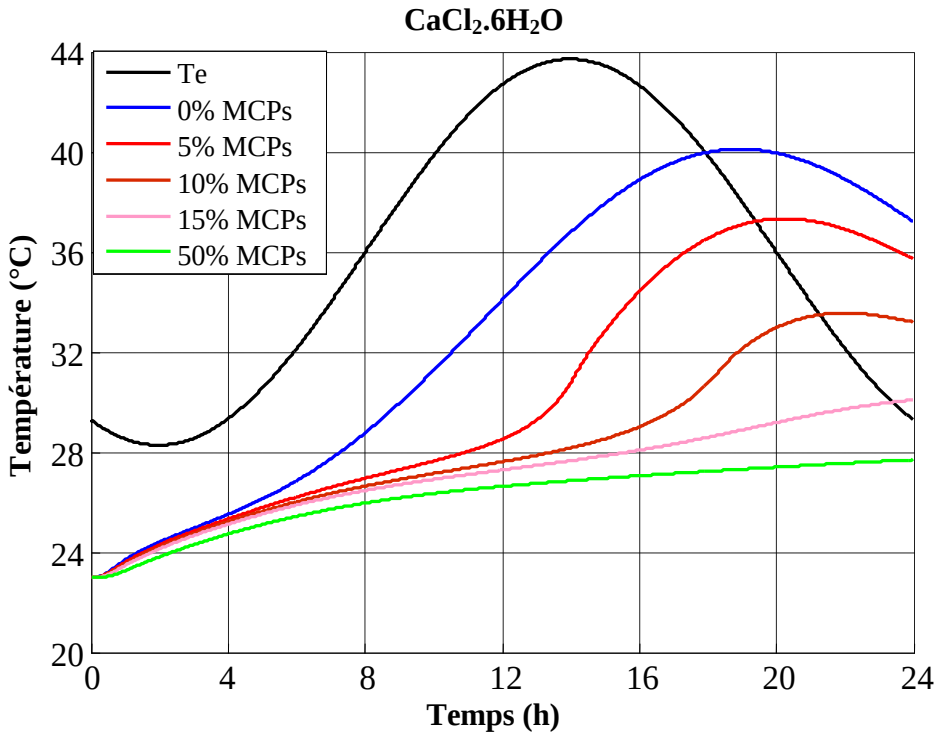


Figure 3.8. Comparaison des évolutions de la température intérieure pour des concentrations différentes (cas: $CaCl_2.6H_2O$).

Le stockage par le plâtre est un stockage par chaleur sensible. On observe bien l'efficacité du plâtre sur l'atténuation de l'amplitude des oscillations. Il y a pratiquement un déphasage de 5 heures.

On remarque, en outre, que la stabilité de la température de la surface intérieure est liée au taux (l'augmentation de la quantité du MCP a un effet positif) et au type du MCP contenu dans la paroi (la nature du MCP, en particulier, la température de fusion du MCP). La valeur optimale de la température de fusion dépend de la température intérieure, qui elle aussi dépend de la température extérieure et de la résistante thermique du mur.

La comparaison entre la valeur maximale et la valeur minimale de la température de la surface intérieure ainsi que leur différence pour chaque concentration est effectuée dans les tableaux (3.3, 3.4 et 3.5):

Tableau 3.3: Variation des températures maximales et minimales sur la surface intérieure en fonction de la concentration (Cas: Eicosane).

La concentration	0%	5%	10%	15%	50%
T_{max}(°C)	40.12	37	36.15	35.75	34.77
T_{min}(°C)	23	23	23	23	23
ΔT	17.12	14	13.15	12.75	11.77

Tableau 3.4: Variation des températures maximales et minimales sur la surface intérieure en fonction de la concentration (Cas: $Na_2CO_3 10H_2O$).

La concentration	0%	5%	10%	15%	50%
T_{max}(°C)	40.12	34.91	32.57	31.85	30.8
T_{min}(°C)	23	23	23	23	23
ΔT	17.12	11.91	9.57	8.85	7.8

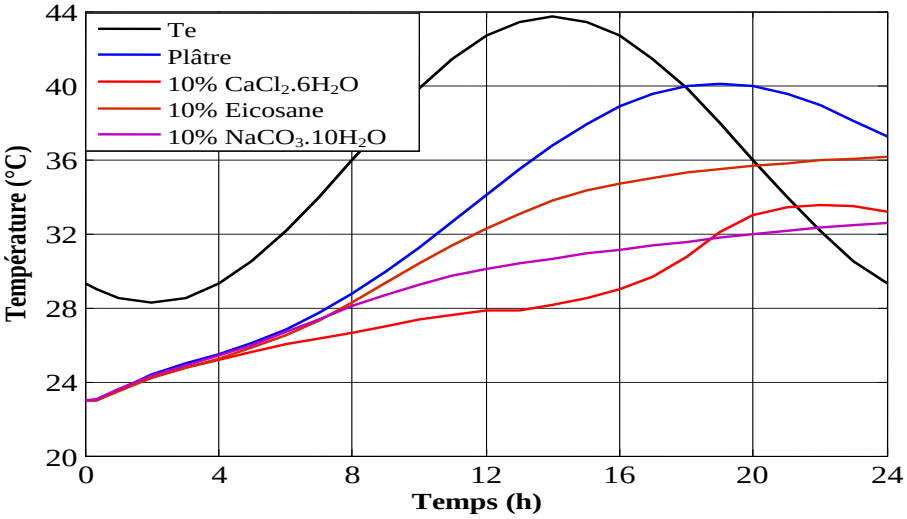
Tableau 3.5: Variation des températures maximales et minimales sur la surface intérieure en fonction de la concentration (Cas: $CaCl_2.6H_2O$).

La concentration	0%	5%	10%	15%	50%
T_{max}(°C)	40.12	37.33	33.57	30.1	27.7
T_{min}(°C)	23	23	23	23	23
ΔT	17.12	14.33	10.57	7.1	4.7

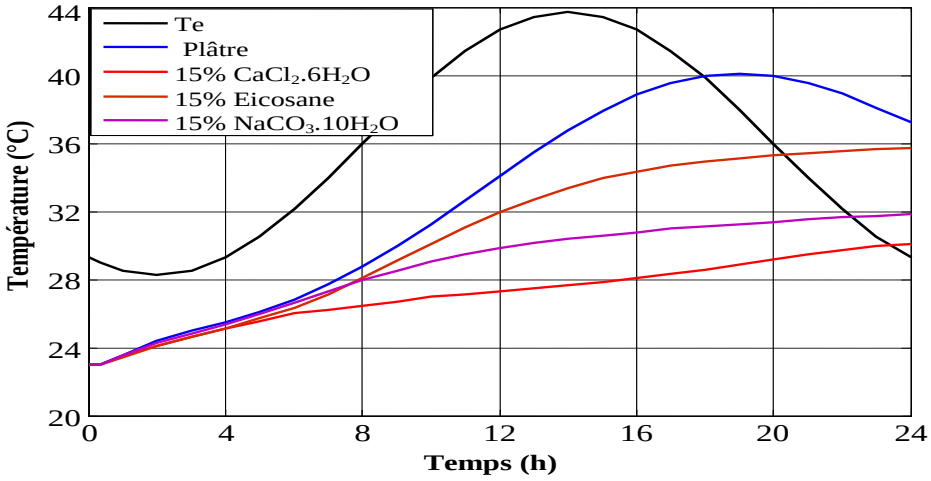
D'après les résultats présentés, on remarque que l'écart entre les températures maximales et minimales diminue avec l'augmentation de la concentration de MCP.

3.2.4.4. Comparaison des simulations pour différents MCPs

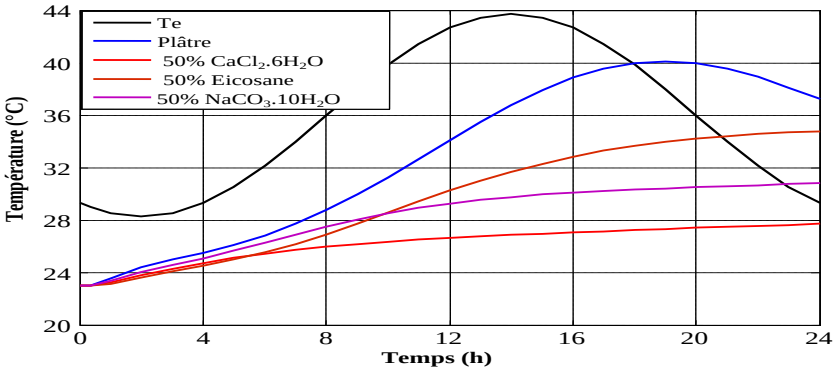
Nous allons comparer dans ce qui suit les profils de températures intérieures et extérieures des murs pour trois MCP différents. Les trois mélanges étudiés sont respectivement (Eicosane/ Plâtre), ($CaCl_2.6H_2O$ / Plâtre) et ($Na_2CO_3.10H_2O$ / Plâtre), et ceci pour différentes concentrations de MCPs (10%,15% et 50%).



(a) Concentration de 10%



(b) Concentration de 15%



(c) Concentration de 50%

Figure 3.9. Comparaison de la variation de la température intérieure pour trois parois de concentrations identique.

La comparaison entre la valeur maximale et la valeur minimale de la température de la surface intérieure ainsi que leur différence pour chaque concentration est effectuée dans les tableaux (3.6, 3.7 et 3.8):

Tableau 3.6: Comparaison entre la valeur maximale et la valeur minimale de la température de la surface intérieure pour chaque type de MCP (10% MCP).

	Eicosane	**$CaCl_2.6H_2O$**	**$Na_2CO_3.10H_2O$**
T_{max}(°C)	36.15	33.57	32.57
T_{min}(°C)	23	23	23
$\Delta T(C)$	13.15	10.57	9.57
$t_{déphasage}$ (h)	7	5	7

Tableau 3.7: Comparaison entre la valeur maximale et la valeur minimale de la température de la surface intérieure pour chaque type de MCP (15% MCP).

	Eicosane	**$CaCl_2.6H_2O$**	**$Na_2CO_3.10H_2O$**
T_{max}(°C)	35.75	30.1	31.85
T_{min}(°C)	23	23	23
ΔT	12.75	7.1	8.85
$t_{déphasage}$ (h)	7	7	7

Tableau 3.8: Comparaison entre la valeur maximale et la valeur minimale de la température de la surface intérieure pour chaque type de MCP (50% MCP).

	Eicosane	**$CaCl_2.6H_2O$**	**$Na_2CO_3.10H_2O$**
T_{max}(°C)	34.77	27.7	30.8
T_{min}(°C)	23	23	23
ΔT	11.77	4.7	7.8
$t_{déphasage}$ (h)	7	7	7

La figure 3.9 met bien en évidence le comportement de chaque type de paroi ainsi que la différence entre les trois types de MCPs.

Les écarts de température diminuent au fur et à mesure qu'on augmente les concentrations de MCP dans les mélanges. Ce constat est valable pour les types de MCP utilisés. Le mélange

plâtre/ $CaCl_2.6H_2O$ dans les trois cas de figure présente les meilleures caractéristiques vis-à-vis de l'isolation thermique. Un déphasage entre la température maximale sans MCP et la température maximale avec MCP est apparu pour différentes concentrations. En ce qui concerne l'eicosane et le $NaCO_3.10H_2O$, lé déphase demeure constant égal à 7 heures et reste insensible à la concentration utilisée. Pour le $CaCl_2.6H_2O$, le déphasage est fonction de la concentration et atteint un déphasage maximum de 7 heures à partir d'une concentration de 15%.

Les MCP utilisés dans les cloisons seront ceux qui ont des points de fusion et de solidification aux températures qui réalisent le confort thermique avec le prix le plus faible possible. Le tableau 3.9 donne les prix de chaque composé étudié.

Tableau 3.9: Prix des composés étudiés (Analytical Reagents and standards, 2010)

Les composés	Quantité (kg)	Prix ($)
Eicosane	0.025	10.5
	0.1	27.6
$Na_2CO_3.10H_2O$	0.5	16.2
	2.5	31.2
	5	47.5
$CaCl_2.6H_2O$	0.25	10.9
	1	29.4
	5	87.1

Le tableau 3.9 indique que les prix des composés chimiques utilisés diminuent au fur et à mesure que les quantités augmentent. Nous présentons sur la figure suivante les prix des MCP en fonction des quantités.

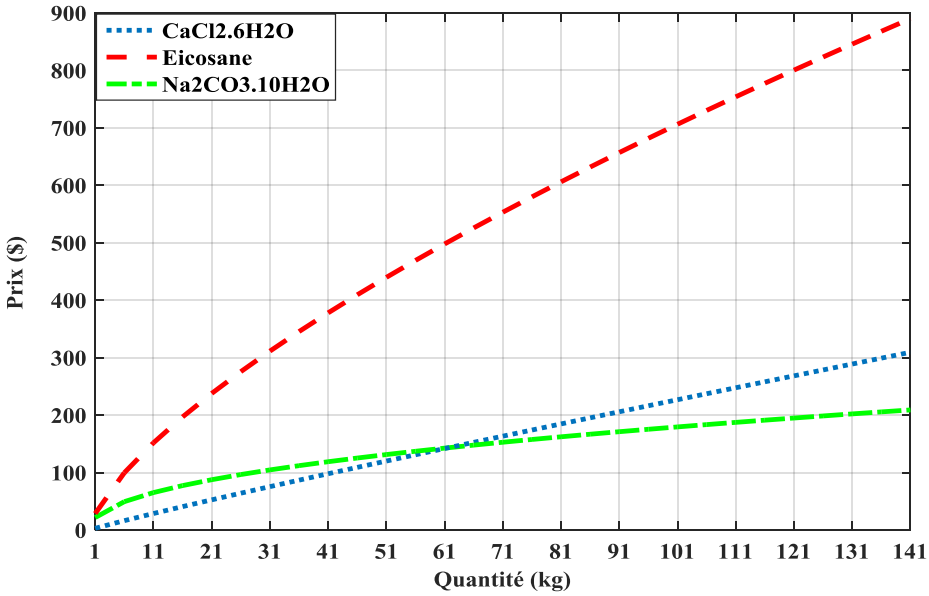


Figure 3.10: Les coûts des MCP en fonction de la quantité.

On remarque que, pour une quantité de MCP supérieure à 61 kg le $CaCl_2.6H_2O$ a un prix faible que celui du $Na_2CO_3.10H_2O$.

A partir de résultats obtenus, on peut dire que le $CaCl_2.6H_2O$ ayant un point de fusion égale à la température (29 °C) réalise le meilleur confort thermique vis-à-vis de l'environnement choisi de la ville de Ouargla avec le cout le plus faible comparé avec les autres MCPs étudiés. Ainsi, nous ferons le choix de ce composé pour la suite du travail.

3.3. Effet de l'orientation de mur sur la concentration optimale de MCP

L'étude par simulation numérique de paroi constituée d'un mélange plâtre-MCPs a montré que la quantité de MCP devrait être augmentée pour améliorer l'efficacité énergétique de la paroi. Donc il est nécessaire de faire une analyse économique pour déterminer la concentration optimale des matériaux d'isolation pour chaque orientation.

Les objectifs préconisés dans cette partie sont la détermination de la concentration optimale de l'isolation (MCP) pour différentes orientations de mur sous les conditions climatiques de la ville de Ouargla. Le gain de chaleur annuel étant déterminé au moyen de la méthode explicite par différences finies dans des conditions périodiques régulières. Puis, la concentration optimale de MCP et le temps de retour d'investissement pour toutes les orientations de mur seront calculées en employant ces charges dans l'analyse du coût.

3.3.1. Effet de l'orientation sur la température intérieure d'un mur vertical

Lorsqu'on a affaire à un bâtiment sur plan, le facteur d'orientation est appréciable dans ces effets non pas au bâtiment d'ensemble, mais à ses différentes pièces.

Le choix d'une orientation est soumis à de nombreuses considérations, cependant la position de la façade par rapport au soleil qu'affecte l'ambiance intérieure. Cet aspect est fixé comme objectif dans cette partie.

3.3.1.1. Modèle physique

Le modèle physique considéré est présenté dans la figure 3.11. Il s'agit d'un mur multicouche vertical orienté vers les quatre faces (Nord, Sud, Est et Ouest). La surface extérieure du mur est exposée au rayonnement solaire périodique et à la température de l'air extérieur. La surface intérieure ayant une température constante égale à celle de l'air de la pièce. La structure du mur est constitué de quatre couches parallèles de matériaux différents telles que : le plâtre, isolant (mélange plâtre/MCPs), brique et plâtre. Les épaisseurs de chaque matériau utilisé sont respectivement 2 cm, 2cm, 15 cm et 2cm. Dans cette étude, le matériau à changement de phase choisi est le $CaCl_2.6H_2O$, vu qu'il présente le meilleur choix technico-économique comparé aux trois types du MCP étudiés. Les propriétés thermiques des matériaux employées dans la structure de mur sont données dans les tableaux (3.2 et 3.10).

Tableau 3.10: Paramètres utilisés dans les calculs (Ghedamsi et al., 2014).

Paramètres	**Valeurs**
Brique	
Conductivité thermique Masse volumique Capacité calorifique	0.62 W/m°C 1800 kg/m^3 840 J/kg°C
Electricité	
Cout d'électricité	0.11 $/kWh
Coefficient de performance, COP	2.5
Taux d'actualisation, r	0.05

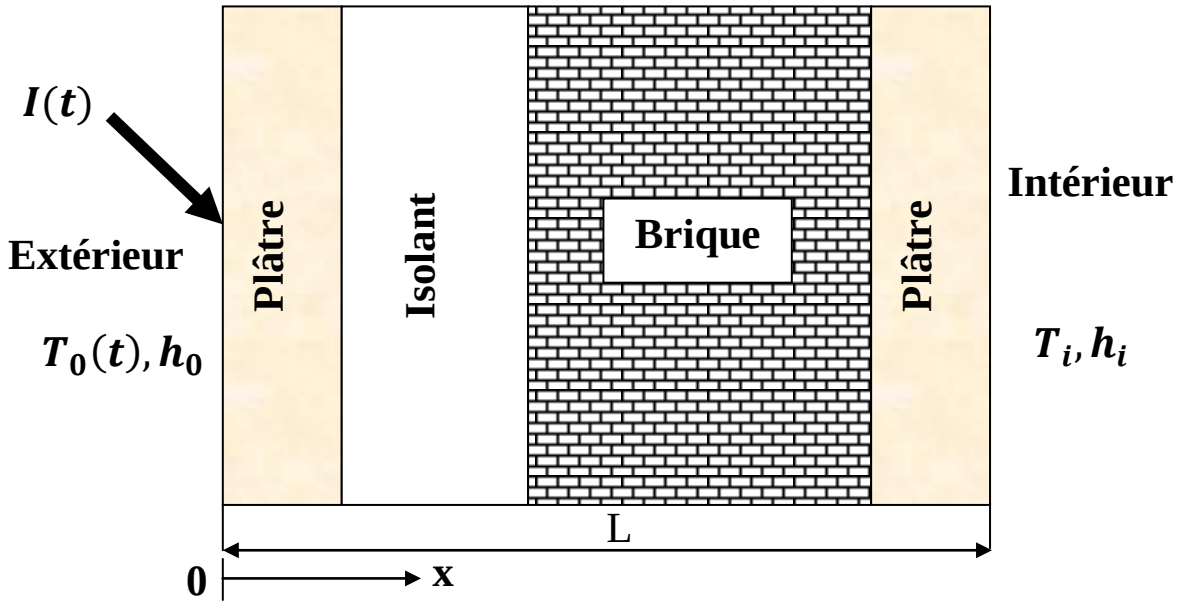


Figure 3.11 : Structure du mur multicouche

3.3.1.2. Modèle mathématique

En régime transitoire, l'équation de conduction de la chaleur du mur multicouche s'écrit:

$$\frac{\partial(\rho_j C_j T_j)}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x}\left(k_j \frac{\partial T_j}{\partial x}\right) \qquad 3.14$$

j	Numéro des couches
ρ_j	Masse volumique de la j ^{éme} couche (kg/m^3)
C_j	Chaleur spécifique de la j ^{éme} couche (J/kg.°C)
k_j	Conductivité thermique de la j ^{éme} couche (W/m.°C)

Pour simplifier le modèle mathématique, nous considérons quelques hypothèses et approximations (Ghedamsi R et al., 2014):

- Aucune génération de chaleur.
- Les propriétés thermophysiques des matériaux de construction sont constantes, mais ayant des valeurs différentes pour le solide et la phase liquide. Ainsi, la masse volumique et la conductivité de MCP sont des fonctions de la fraction fondue.

- L'épaisseur du mur multicouche est petite par rapport à sa largeur et sa longueur. Par conséquent, le transfert thermique par le mur est unidimensionnel.
- La résistance d'interface est négligeable.

3.3.1.3. Les conditions initiales et aux limites

Les conditions initiales et aux limites choisies pour simuler les variations journalières de température sont les suivantes :

$$T_j(x,0) = T_{ini}, \qquad 3.15$$

$$-k\left(\frac{\partial T}{\partial x}\right)_{x=0} = h_0(T_e(t) - T_{x=0}) + \alpha.I(t) \qquad 3.16$$

$$-k\left(\frac{\partial T}{\partial x}\right)_{x=L} = h_i(T_{x=L} - T_{int}) \qquad 3.17$$

Où T_{ini} est la température initiale du mur multicouche.

Dans cette étude, les températures maximale et minimale employées dans la relation (3.13) pour déterminer la température ambiante de Ouargla sont obtenues en faisant la moyenne des mesures mensuelles enregistré dans des stations météorologiques au cours des années 2000-2010 (ONM, 2011). On prend la température de confort thermique pour la période estivale $T_{con} = 26°C$ et la température de l'air intérieur égal à 23°C. α est le coefficient d'absorption de la surface extérieure de mur, pour notre étude α =0.4 et les coefficients de transfert de chaleur par convection entre les fluides et les faces internes et externes sont respectivement égales à 10 W/m^2°C et 20W/m^2°C (Daouas N et al., 2010) (Ghedamsi R et al., 2014).

Le rayonnement solaire $I(t)$ pour les murs verticaux à différentes orientations est calculé par la relation suivante (Ghedamsi R et al., 2014) :

$$I = R_d.I_d + \left(I_y + I_a.\rho_y\right)/2 \qquad 3.18$$

Où

I_d Rayonnement direct horaire sur une surface horizontale (W/m^2)

I_a Rayonnement global horaire sur une surface horizontale (W/m^2)

I_y Rayonnement diffus horaire sur une surface horizontale (W/m^2)

Le facteur de conversion R_d donné par :

$$R_d = \frac{\cos\delta \sin\psi \cos a \cos\omega + \cos\delta \sin a \sin\omega - \sin\delta \cos\psi \cos a}{\cos\psi \cos\delta \cos\omega + \sin\psi \sin\delta} \qquad 3.19$$

Où a, varie entre -180° et 180°, négatif à l'est, positif à l'ouest, par convention et vaut 0° au Sud dans l'hémisphère nord (Ozel M, 2011).

L'équation différentielle (3.14) a été discrétisée par la méthode de différences finies (la méthode explicite) (voir Annexe 3.a). A chaque itération, le vecteur des inconnues discrètes se détermine par simple produit matriciel. Un code de calcul numérique écris sous langage Matlab est utilisé pour la résolution des équations. La solution numérique obtenue exprime la variation de la température horaire de la surface intérieure du mur.

Le gain de chaleur du mur à l'espace intérieur est obtenu comme suit:

$$q_i = h_i(T_{x=L} - T_{int}) \qquad 3.20$$

Dans cette étude, les calculs sont effectués pendant un jour type pour chaque mois de l'année pour des pourcentages donnés d'un MCP. Le jour type de chaque mois de l'année est considéré comme jour représentatif. Une fois le gain de chaleur instantané est calculé, le gain thermique quotidien est obtenu par l'intégration pendant 24 heures de gain instantané. Le procédé est répété pour chaque jour des mois d'été (de Juin à Septembre). Le gain de chaleur annuel est calculé à partir des charges quotidiennes de transmissions par mètre carré qui sont ajoutées sur toute l'année.

La figure 3.12 présente les irradiations globales pour un mur vertical pour quatre orientations (Nord, Sud, Est et Ouest) durant un mois froid de l'année -Janvier- pour la ville de Ouargla.

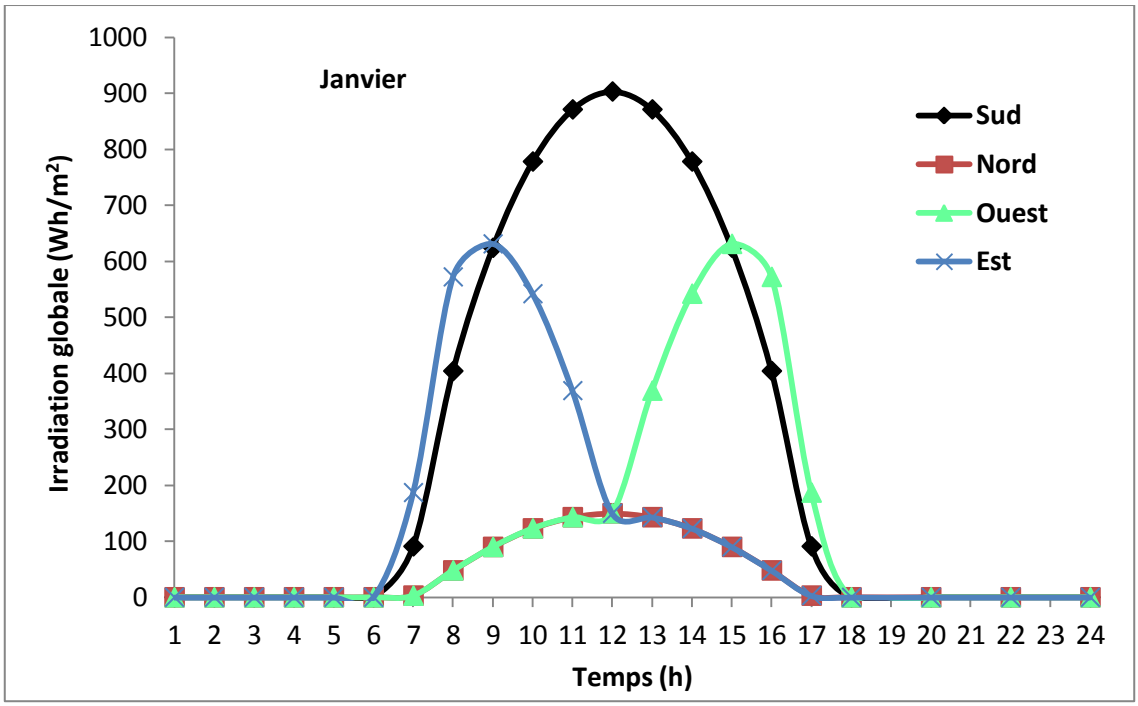


Figure 3.12 : Irradiations globales pour un mur vertical pour quatre orientations durant un mois froid de l'année -Janvier- pour la ville de Ouargla.

En effet, le mur vertical Sud reçoit le maximum de rayonnement solaire au mois de Janvier comparé aux autres orientations avec une irradiation globale maximale égal à 903Wh/m².

L'orientation Nord, est considérée comme la plus défavorable, avec une irradiation globale maximale de 151Wh/m², car elle reçoit le minimum de radiations solaires en hiver.

L'orientation Est reçoit la même quantité d'énergie que celle d'Ouest (631Wh/m^2).

La lecture de la figure ci-dessous (figure 3.13) démontre l'irradiation globale pour un mur vertical pour quatre orientations (Nord, Sud, Est et Ouest) durant un mois chaud de l'année correspondant au mois de Juillet pour la ville de Ouargla.

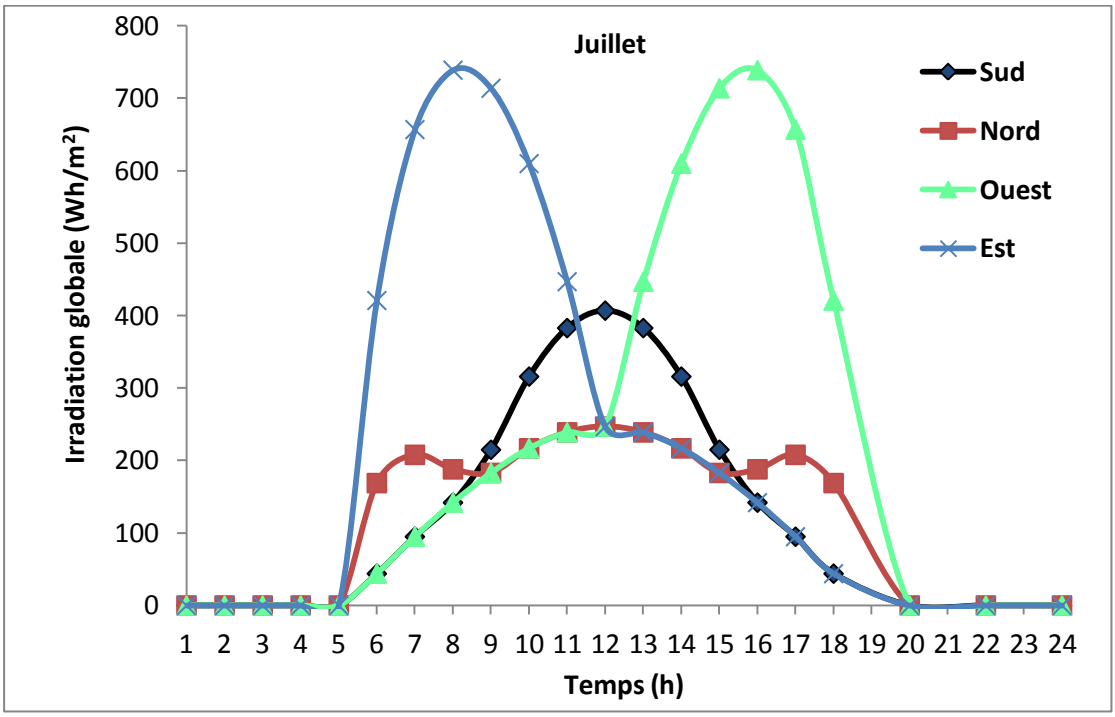


Figure 3.13 : Irradiations globales pour un mur vertical pour quatre orientations durant un mois chaud de l'année -Juillet- pour la ville de Ouargla.

En effet, le mur vertical Nord reçoit le minimum de radiations solaires au mois de juillet comparé aux autres orientations avec une irradiation globale maximale égal à 247 Wh/m².

Les orientations Est et Ouest, sont considérées les plus défavorables, avec une irradiation globale maximale de 739 Wh/m² car elles reçoivent le maximum de radiations solaires en été. Quant à l'orientation Sud, elle reçoit une quantité d'énergie maximale de 407 Wh/m².

Toutes ces données, nous permettent de conclure que l'orientation sud reçoit le maximum de radiation en hiver, et l'orientation Nord reçoit le minimum en été par rapport aux autres orientations.

Nous présentons sur la figure 3.14 l'effet de l'orientation sur la température intérieure d'un mur vertical sans MCP et avec MCP et ceci pour différentes concentrations.

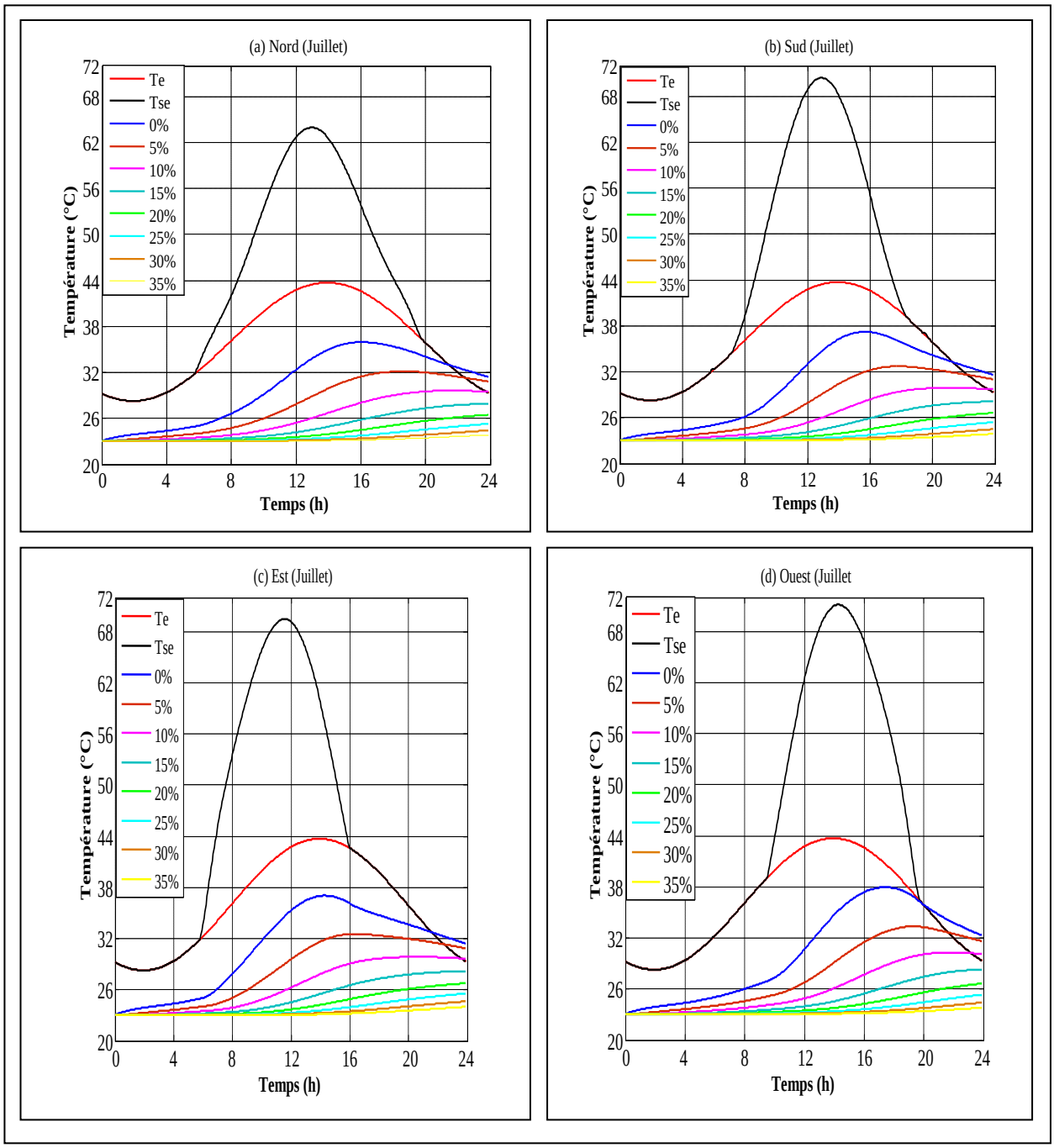


Figure 3.14: Effet de l'orientation sur la température intérieure et extérieure d'un mur vertical (17 Juillet).

A partir d'une concentration de 25%, la température de la surface intérieur ne dépasse pas la température de confort thermique estivale (26°C) et ceci pour toutes les orientations étudiées.

Pour montrer l'effet de l'orientation du mur sur le confort intérieur de l'enceinte, nous avons choisi de présenter pour une concentration du MCP égal à 15% les profils intérieurs de la température et ceci pour les quatre orientations proposées (Nord, Sud, Est et Ouest).

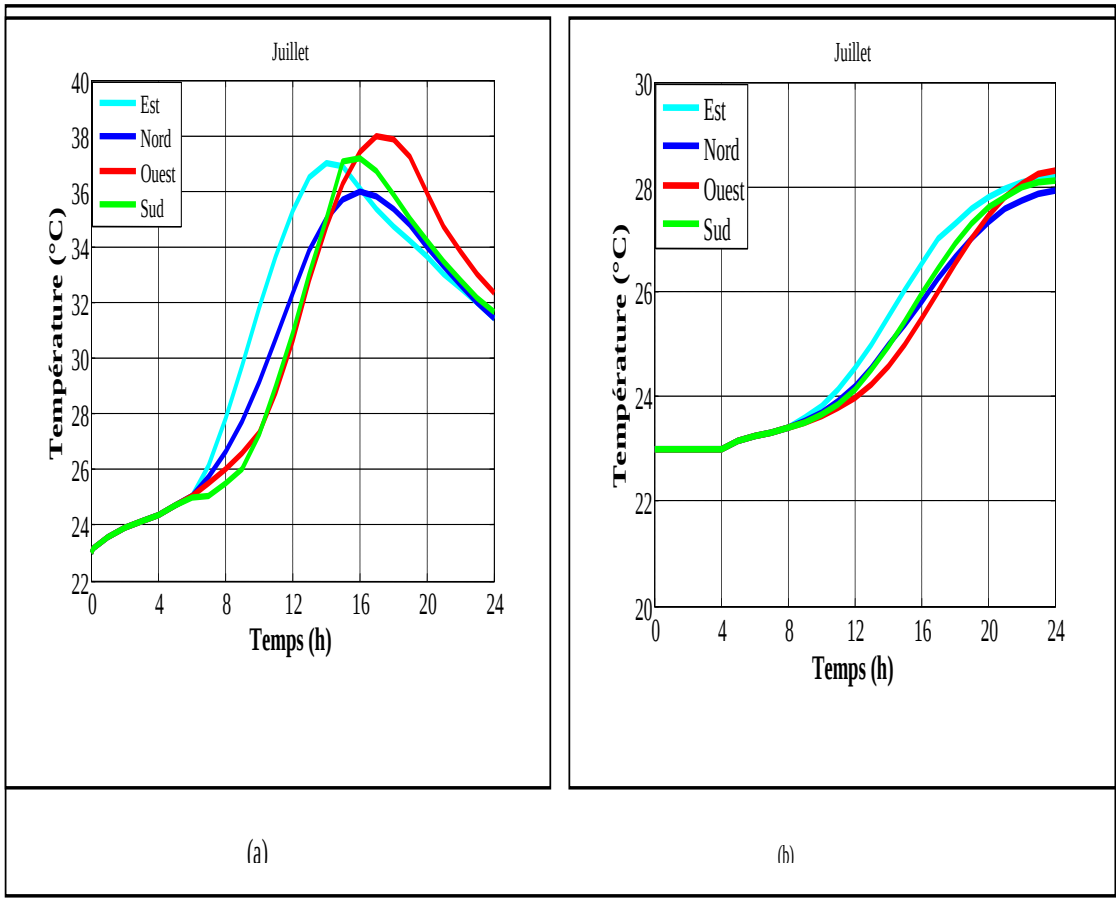


Figure 3.15: Effet de l'orientation sur la température intérieure d'un mur vertical:(a) sans MCPs, (b) avec MCPs (15%).

Le mur proposé avec une concentration de $CaCl_2.6H_2O$ présente pour toutes les orientations une réduction significative des fluctuations de la température sur la surface intérieure comparée au mur sans MCP. Nous remarquons aussi que les températures de la surface intérieure du mur orienté Nord ont des valeurs inférieures à celles des murs Est, Sud et Ouest pour le jour type choisi. Les écarts de températures maximales et minimales du mur avec et sans MCP (concentration égale à 15%) pour les orientations Nord, Sud, Ouest et Est sont respectivement égales à 8.07, 9.06, 9,68 et 8.82.

La figure 3. 16 montre l'effet de la concentration du MCP sur la charge annuelle de transmission de chaleur de refroidissement pour un mur vertical pour quatre orientations durant six mois de la période estivale (de Juin à Septembre).

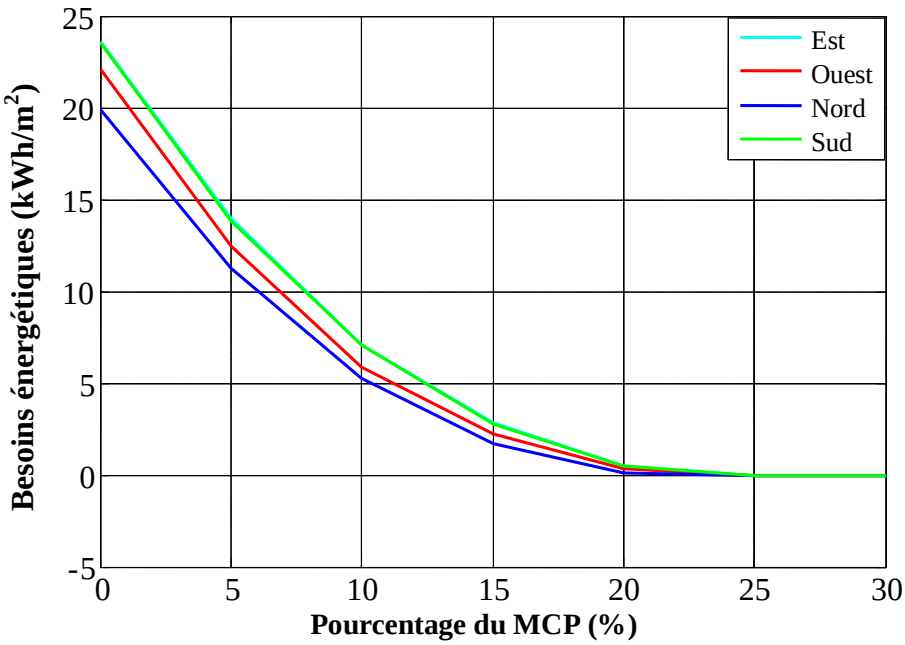


Figure 3.16: Effet de la concentration du MCP sur les besoins énergétiques pour un mur vertical pour quatre orientations.

On peut noter que l'augmentation de la concentration du MCP conduit à la diminution de la charge de transmission d'énergie à l'enceinte. Cette diminution est très rapide pour les petites valeurs de concentration du MCP (de 0 à 10%). Nous déduisons de cette figure que les orientations Ouest et Sud fournissent des charges de transmission de chaleur égaux et qui sont les plus forts comparés aux orientations Est et Nord. La valeur la plus basse de la charge de refroidissement est donnée pour le mur exposé au Nord et ceci pour toutes les concentrations étudiées. A partir de la concentration du MCP supérieur ou égal 25%, les charges annuelles de transmission de chaleur de refroidissement sont identiques et égal à zéro pour toutes les orientations étudiées. Pour une concentration égale à 20%, la charge annuelle de transmission de chaleur est annulée pour le mur orienté Nord seulement.

La figure 3.17 présente la charge annuelle de refroidissement obtenues avec et sans MCPs (pour les différentes orientations).

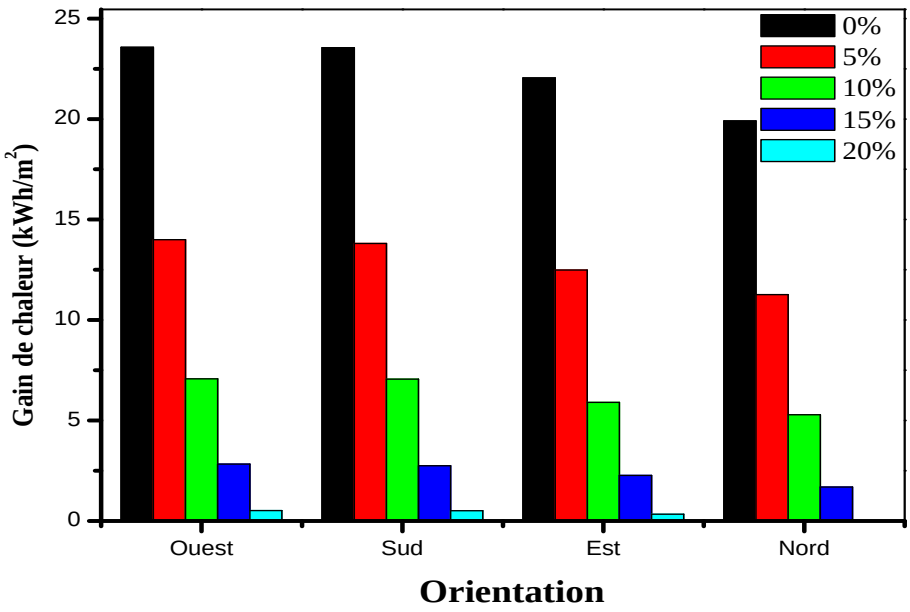


Figure 3.17: Gain de chaleur annuel pour un mur orienté Nord, Sud, Est, et Ouest à différentes concentrations du MCP.

La figure 3.18 Nous permet de conclure que l'orientation Nord considérée est la plus favorable d'un point de vue charge de refroidissement, avec une charge de transmission globale de refroidissement de 19.91 kWh/m² (mur sans MCP) car elles reçoivent le minimum de charge de transmission en période estivale. On observe bien l'effet de l'orientation de l'habitation sur sa température intérieure qui diminue avec l'augmentation de la concentration du MCP jusqu'à annulation du gain annuel pour la concentration de 25% et ceci pour toutes les orientations.

3.3.2. Analyse économique

L'utilisation de l'isolation thermique réduit la charge de climatisation, ainsi le coût énergétique de refroidissement en été. Cependant, les prix des matériaux d'isolation augmentent le coût initial de la construction. Par conséquent, une analyse économique devrait être exécutée afin d'estimer la concentration optimale du MCP qui réduit au minimum le coût total comprenant l'isolation et les coûts de consommation d'énergie au cours de la période de la vie du bâtiment. Le coût total par unité de surface de mur est donné par (Ghedamsi R et al., 2014) (Daouas N et al., 2010):

$$C_t = C_{enr}.PWF + C_i \qquad 3.21$$

C_{enr} Cout d'énergie ($/m^2)

PWF Facteur de la valeur actuelle

C_i Coût d'isolation par unité de surface ($/m^2)

Le coût d'isolation est donné par:

$$C_i = C_{MCP}.W_{MCP}.L \qquad 3.22$$

C_{MCP} Coût de MCP par unité de volume ($/m^3)

L Epaisseur de la couche de plâtre/MCP (m)

Le cout annuel d'énergie par unité de surface du mur pour le refroidissement (C_r) est donnée par (Ghedamsi et al., 2014).

$$C_r = \frac{Q_r.C_{el}}{COP} \qquad 3.23$$

Q_r Gain annuel de la chaleur (kWh/m^2)

COP Coefficient de performance du dispositif de climatisation

C_{el} Cout d'électricité ($/kWh)

Le facteur de valeur actuelle du coût de consommation d'énergie (PWF) est défini comme suit:

$$PWF = \frac{(1+r)^n - 1}{r(1+r)^n} \quad , \quad \begin{cases} i > g & r = \frac{i-g}{1+g} \\ i < g & r = \frac{g-i}{1-i} \end{cases} \qquad 3.24$$

$$PWF = \frac{1}{1+i'} \qquad 3.25$$

n Durée de vie (30 ans)

r Taux d'actualisation (%)

i Taux d'intérêt (%)

g Taux d'inflation (%)

Le temps de retour d'investissement $(PWF_{(Pb)})$ est le coût d'isolation divisé par les économies d'énergie annuelles (A_s) , il est simplement donné par (Ghedamsi R et al., 2014):

$$PWF_{(Pb)} = \frac{C_{MCP}.(W_{MCP})_{opt}.L}{A_s} \qquad 3.26$$

Par conséquent, nous avons:

$$Pb = \frac{\ln\left(1-r\left(\frac{C_{MCP}.(W_{MCP})_{opt}.L}{A_s}\right)\right)}{\ln(1/(1+r))} \qquad 3.27$$

Les économies d'énergie annuelles sont définies comme la différence entre le coût énergétique sans isolation et le coût énergétique avec une isolation qu'utilise une concentration optimale du MCP, divisée par le PWF. Les paramètres utilisés dans les calculs sont donnés dans le tableau 3.10.

Dans la figure 3.18, le coût de consommation d'électricité, le coût du MCP et le coût total sont tracés en fonction de la concentration du MCP pour chaque orientation.

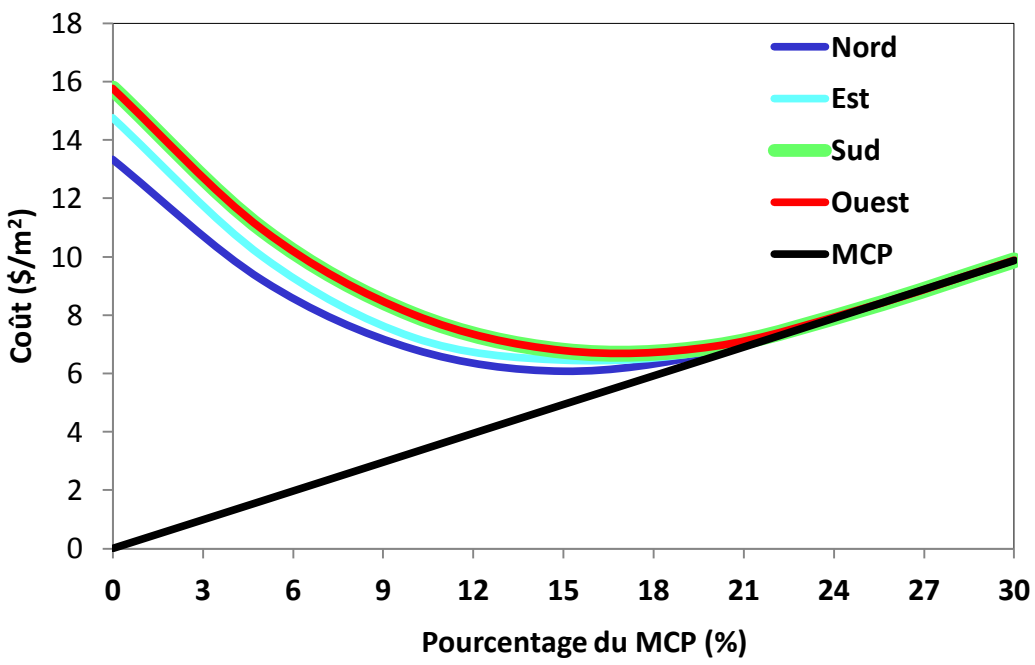


Figure 3.18 : Coût du MCP et le coût total en fonction avec la concentration du MCP pour chaque orientation.

Comme prévu, la courbe de coût total montre un minimum qui correspond à la concentration optimale du MCP. Les résultats prouvent que la concentration optimale du MCP pour chaque orientation est de 15% et le temps de retour d'investissement pour les orientations Ouest/ Sud, Est et Nord sont respectivement: 10.51, 9.14 et 8.51 ans.

3.4. Conclusion

Dans ce chapitre, on a étudié le comportement thermique d'une paroi contenant un MCP pour réaliser le confort thermique et économique de l'énergie dans les bâtiments en été. Pour cela, une simulation numérique a été réalisée avec le l'outil Matlab sur différents types de paroi. Le travail entrepris dans cette étude consiste en deux parties essentielles. Dans la première partie, on a étudié le comportement thermique d'une paroi en plâtre contenant trois types différents de MCPs (Eicosane, $Na_2CO_3.10H_2O$ et $CaCl_2.6H_2O$ et) avec des concentrations variables pour effectuer le choix technico-économique d'un matériau à changement de phase.

La deuxième partie a été dédiée à l'étude de l'effet d'orientation sur la température intérieure d'un mur vertical, et la détermination de la concentration optimale pour le MCP choisi pour différentes orientations de mur sous les conditions climatiques de la ville de Ouargla. Les résultats obtenus ont mis en évidence :

- Le $CaCl_2.6H_2O$ donne des bons résultats comparé avec les autres MCPs étudiés. L'augmentation de pourcentage de MCP permet d'augmenter l'inertie thermique.
- Un déphasage entre la température maximale sans MCP et la température maximale avec MCP est apparu pour différentes concentrations. Pour le $CaCl_2.6H_2O$, le déphasage est fonction de la concentration et atteint un déphasage maximum de 7 heures à partir d'une concentration de 15%.
- Le mur proposé avec une concentration de $CaCl_2.6H_2O$ présente pour toutes les orientations une réduction significative des fluctuations de la température sur la surface intérieure comparée au mur sans MCP. Nous remarquons aussi que les températures de la surface intérieure du mur orienté Nord ont des valeurs inférieures à celles des murs Est, Sud et Ouest pour le jour type choisi. Les écarts de températures maximales et minimales du mur avec et sans MCP (concentration égale à 15%) pour les orientations Nord, Sud, Ouest et Est sont respectivement égales à 8.07, 9.06, 9,68 et 8.82.

- Les orientations Ouest et Sud fournissent des charges de transmission de chaleur de refroidissements égaux qui sont le plus fortement comparés aux orientations de l'Est et du Nord. La charge de refroidissement la plus faible est donnée pour le mur exposé au Nord.
- Une étude d'optimisation technico-économique a permis d'obtenir une concentration optimale du MCP pour chaque orientation de 15%.
- le temps de retour de l'investissement pour les orientations Ouest/ Sud, Est, et Nord est respectivement de 10.51, 9.14 et 8.51 ans.

Les résultats nous ont permis aussi de conclure que l'orientation Nord considérée est la plus favorable, car elle reçoit le minimum de charge de transmission en été. Nous remarquons aussi qu'à partir d'une concentration de MCP égale à 25%, l'effet de l'orientation des parois extérieur sur sa température intérieure est inexistant.

Chapitre 4

Etat de l'art de la démarche prospective énergétiques et classification des modèles existants

4.1. Introduction

Le secteur résidentiel en Algérie consomme 33% de l'énergie finale et émet en moyenne 21 % des gaz à effet de serre (ME, 2016). Il est à ce titre considéré comme la deuxième source d'émissions de CO_2 après les transports. Les bâtiments disposent néanmoins d'un important potentiel d'économies d'énergie. Incitée par cette situation, L'efficacité énergétique est appelée à jouer un rôle important dans le contexte énergétique national. Cependant, ces efforts risquent d'être inefficaces sans une vision prospective de l'évolution des consommations d'énergie, à savoir, l'élaboration d'un modèle de prospective énergétique. Il est alors légitime de s'interroger sur l'inefficacité rapportée ci-dessus relativement à l'efficacité des outils actuels dans la réduction des consommations et l'atténuation des émissions de CO_2 (Ouahab A, 2015).

La prospective de la demande d'énergie joue un rôle très important dans la détermination des stratégies d'exploitation optimale, de planification des réseaux électriques, détermination du futur possible de l'évolution des trajectoires des consommations et des émissions, trouver les stratégies répondant aux incertitudes réelles, prévoir la croissance future des consommations d'énergie, détermination les gisements d'économies d'énergie dans le secteur résidentiel, et avec quelles méthodes les quantifier et les exploiter, trouver les leviers technologique disponible pour atteindre nos objectifs en termes d'amélioration de la performance énergétique des logements, de stabilisation des émissions de CO_2 et de gestion des charges dans le secteur résidentiel. La prévision des consommations d'énergie dépend de différents facteurs socio-économiques, comportementaux, technologiques et climatiques (Gouveia J. P, 2012).

L'élaboration d'un modèle est donc nécessaire pour évaluer l'impact technico-économique d'une politique énergétique. Il existe différentes techniques de modélisations utilisées dans la quantification des consommations énergétiques et des émissions de CO_2 dans le secteur résidentiel. Ce chapitre vise :

- dans un premier temps à établir un aperçu sur les modèles de prospective énergétique existants,
- dans un deuxième temps à analyser les forces et les faiblesses de chaque modèle.

4.2. Fondement de la démarche prospective

Le concept prospective existait depuis longtemps et sous de nombreuses formes : de la divination et consultation des auspices des sociétés traditionnelles ou de l'antiquité à la fiction

littéraire telle que traitée par Jules Verne et de nombreux auteurs de science-fiction qui ont anticipé sur leur époque pour imaginer le futur (par exemple, dans La Guerre des mondes, H. G. Wells décrit une arme dont les effets rappellent ceux du laser bien avant son invention). Depuis la Seconde Guerre mondiale, les travaux de prospective se sont considérablement développés. Se distinguant clairement de la prévision, même s'ils s'appuyaient parfois sur elle, ils étaient une tentative de clarifier les conditions dans lesquelles des décisions impliquant l'avenir pouvaient être prises (Plassard F, 2003). L'analyse prospective est une démarche qui vise, par une approche rationnelle et holistique, à se préparer aujourd'hui pour demain. Elle consiste à élaborer différents scénarios des avenirs possibles pour améliorer la visibilité du futur et apporter une aide à la décision. Pour y parvenir, l'analyse prospective cherche à mettre en évidence une très large gamme d'avenirs possibles. Elle diffère en cela de la prévision qui cherche à dégager différents scénarios à partir des comportements passés des variables et des acteurs. La prévision se trouve en fait contrainte par l'information dominante ou l'information moyenne contenue dans la chronologie des évolutions plus ou moins récentes des phénomènes étudiés. La prospective diffère également de la planification qui se fixe d'emblée un objectif à partir de l'évaluation de la situation présente. La planification écarte alors de fait un ensemble de scénarios plausibles et s'efforce à trouver les moyens de réaliser celui qui a été choisi comme cible. La prospective produit une vision plus large que celle de la prévision et de la planification, en ce qu'elle explore aussi un ensemble de situations qui ne sont pas a priori jugées souhaitables (comme le fait la planification) ou qui ne sont pas fortement probables (comme c'est le cas avec la prévision). La prospective permet d'imaginer des situations nouvelles plus diversifiées et plus contrastées que ce que laissent dégager les techniques de prévision. Elle permet également d'avoir une vision des situations qui pourraient être plus intéressantes que des objectifs planifiés a priori et aussi de mettre en évidence des situations indésirables qui méritent d'être dévoilées suffisamment à l'avance (Bouzaïane L et al., 2008).

4.3. Méthodes prospectives dans l'analyse des besoins énergétiques

Il existe plusieurs techniques spécifiques dans l'élaboration d'une analyse prospective. On mentionnera, les méthodes les plus formalisées : l'analyse structurelle, la consultation d'experts, la méthode des impacts croisés, et les scénarios. Toutefois il ne faudrait pas considérer ces méthodes comme étant totalement indépendantes les unes des autres, puisque certaines font appel, au moins en partie, aux autres (Plassard F, 2003).

4.3.1. Analyse structurelle

L'analyse structurelle vise à construire un système d'équations qui représente le fonctionnement d'un système complexe. Elle diffère des systèmes d'équations qui conduisent à une solution, dans la mesure où elle intègre le temps et décrit l'évolution d'un certain nombre de variables stratégiques en fonction des contraintes retenues pour le système. L'analyse structurelle est une méthode d'analyse de système qui se penche sur le domaine étudié en procédant en trois étapes successives :

1) identifier les composantes du système ainsi que les relations entre ces composantes;

2) exposer le fonctionnement du système ;

3) esquisser les évolutions du système.

La richesse de l'analyse structurelle, en même temps que ses limites, tient dans le choix des variables. La méthode oblige à repérer un certain nombre de variables, à établir entre elles des relations directes et indirectes, chiffrées ou non. Cet effort de compréhension d'un système permet ainsi de mettre de l'ordre (Plassard F, 2003).

4.3.2. Consultation d'experts

La technique consultation d'experts, plus connue sous le nom de "méthode Delphi", consiste à interroger un panel d'experts d'un domaine donné pour qu'ils répondent à des questions fermées concernant l'avenir. L'objectif est d'obtenir un consensus entre ces experts en organisant un effet de rétroaction. A partir des réponses obtenues à une première série de questions, on calcule des solutions moyennes que l'on présente aux mêmes experts pour qu'ils donnent leur avis sur ces solutions calculées. Soit ils les acceptent, soit ils les rejettent en fournissant des explications. On organise le plus souvent une troisième, voire une quatrième consultation auprès des mêmes experts pour faire apparaître le consensus recherché. Cette méthode, facile à mettre en œuvre, a été utilisée par les autorités américaines au cours de la seconde guerre mondiale pour dégager un consensus sur les systèmes d'armement à développer. Elle a également été utilisée pour prévoir les dates d'apparition de nouvelles technologies ou de nouveaux produits ou plus récemment dans le domaine des transports.

La principale difficulté que soulève l'utilisation de cette méthode est qu'elle considère les différentes questions, et donc les réponses qui leur sont apportées, comme indépendantes les unes des autres. Elle tend ainsi à faire du domaine abordé par chaque question un domaine autonome. Or l'on sait que la survenance d'un événement peut changer la probabilité d'apparition d'un autre événement. C'est pour tenter de pallier cette difficulté qu'a été mise au point la méthode des impacts croisés (Plassard, F., 2004).

4.3.3. Méthode des impacts croisés

Selon Michel Godet, la méthode des impacts croisés est le terme générique par lequel on désigne une famille de techniques qui tente d'évaluer les changements dans les probabilités d'apparition d'un ensemble d'événements à la suite de l'apparition de l'un d'eux (Godet M, 1977). Cette démarche repose sur l'hypothèse que les variables retenues ne sont pas indépendantes les unes des autres et que la survenance d'un événement peut modifier les conditions d'apparition d'autres événements. On retrouve là une des propriétés de l'analyse des systèmes qui tente, justement, de préciser les relations entre variables. C'est pourquoi la méthode des impacts croisés apparaît plus comme une technique au service d'une réflexion prospective que comme une véritable méthode de prospective (Plassard, F., 2004).

4.3.4. Scénarios

La prospective est connue essentiellement pour son aspect de meilleure vision du futur. Elle est souvent assimilée au résultat le plus apparent de l'analyse à savoir l'identification d'une multitude de situations possibles traduites dans des scénarios (Bouzaïane L, 2008).

Les scénarios représentent des visions alternatives de l'avenir qui permettent d'explorer les implications de différentes hypothèses et de déterminer la robustesse d'évolutions potentielles (Moncomble J. E, 2013). Un scénario décrit les résultats d'un ensemble cohérent d'hypothèses sur l'évolution des variables au cœur du phénomène étudié. Le terme de scénario n'est pas propre dans son acceptation générale à la prospective. On le retrouve par exemple dans la planification et même dans les projections des prévisions. Il prend cependant une connotation prospective, lorsqu'il fait partie d'un ensemble de situations suffisamment différenciées qui explorent des possibilités de ruptures importantes. On peut dire qu'en prospective, les scénarios sont beaucoup plus éloignés les uns des autres que dans le cas de la prévision ou de la planification. Les scénarios en prospective sont ainsi à répartir en deux catégories (Bouzaïane L, 2008): On distingue habituellement les scénarios tendanciels et les scénarios volontaristes.

- Le scénario tendanciel (scénario business as usuel) est décliné comme un scénario sans politique volontariste. On a souvent dit que le scénario tendanciel procédait d'une simple prolongation des tendances, et l'on en a souvent déduit qu'il correspondait au futur le plus probable. Selon l'AIE, le scénario énergétique tendancielle est un scénario où la demande d'énergie évolue dans le futur conformément aux tendances du passé et où aucune politique nouvelle n'est adoptée (Fontaine N, 2003).
- Le scénario volontariste propose des actions de gestion d'énergie en matière d'amélioration et d'efficacité sur les diverses composantes des systèmes énergétiques modélisés, telles que l'intégration des énergies renouvelables, les normes d'efficacité énergétique, les limites sur les émissions de gaz à effet de serre, etc. Les coûts, les émissions de gaz à effet de serre, et autres variables de décisions, sont recalculés en fonction des modifications imposées sur les systèmes énergétiques de référence pour répondre aux défis énergétiques **(**Gouareh A, 2017).

Les objectifs de la méthode des scénarios sont les suivants (Godet M, 1983):

- déceler quels sont les facteurs à étudier en priorité (variables-clés), en mettant en relation, par une analyse explicative globale la plus exhaustive possible, les variables caractérisant le système étudié ;
- déterminer, notamment à partir des variables-clés, les acteurs fondamentaux, leurs stratégies, les moyens dont ils disposent pour faire aboutir leurs projets;
- décrire, sous la forme de scénarios, l'évolution du système étudié, compte tenu des évolutions les plus probables des variables-clés, et à partir de jeux d'hypothèses sur le comportement des acteurs.

La méthode des scénarios comprend deux premières phases : la construction de la base et, à partir de cette base, l'élaboration de scénarios qui conduisent à une troisième phase stratégique.

Le scénario est, en fait, un exercice de décryptage d'un éventuel événement dans le futur. Il est évident que la pertinence du résultat d'un tel scénario est tributaire des choix des hypothèses retenues. Dans ce sens, selon Godet, un scénario doit posséder cinq qualités pour être valable : la pertinence, la cohérence, la vraisemblance, l'importance et la transparence.

Généralement, pour établir un ensemble de scénarios, on détermine d'abord un scénario tendanciel. Ce dernier sert à représenter l'évolution d'un système dans la poursuite des tendances

en cours, c'est-à-dire en l'absence de toute action visant à modifier la transformation de ce système. Le scénario contrasté (par rapport à celui tendanciel) ainsi présenté, en insistant sur des hypothèses d'actions, montre les éventuelles transformations du comportement de ce même système.

Il existe deux principes de projection permettant d'établir des scénarios:

- Le backcasting: à partir des objectifs supposés atteints, le principe de projection à rebours consiste à définir à terme les leviers pour y arriver. C'est une forme d'extrapolation rétrospective qui relié l'avenir au présent. Si nous voulons atteindre un objectif, quelles mesures doivent être prises pour y parvenir?
- Le forcasting: ce principe de projection trace l'évolution des tendances actuelles pour définir <<un scénario de référence>>, notamment au moyen de scénarios contrastés en intégrant des leviers d'action, puis l'interprétation et l'analyse des deux scénarios conduit à proposer les stratégies à mettre en œuvre. Si nous modifions le présent, à quel point les objectifs seront-ils atteints? (Ouahab A, 2015).

4.4. Grandes phases de la méthode des scénarios

Un scénario est un ensemble formé par la description d'une situation future et du cheminement des événements qui permettent de passer de la situation d'origine à la situation future (Monti R et al.,1998).

La figure 4.1 illustre, les grandes phases de la méthode des scénarios mise au point par Godet.

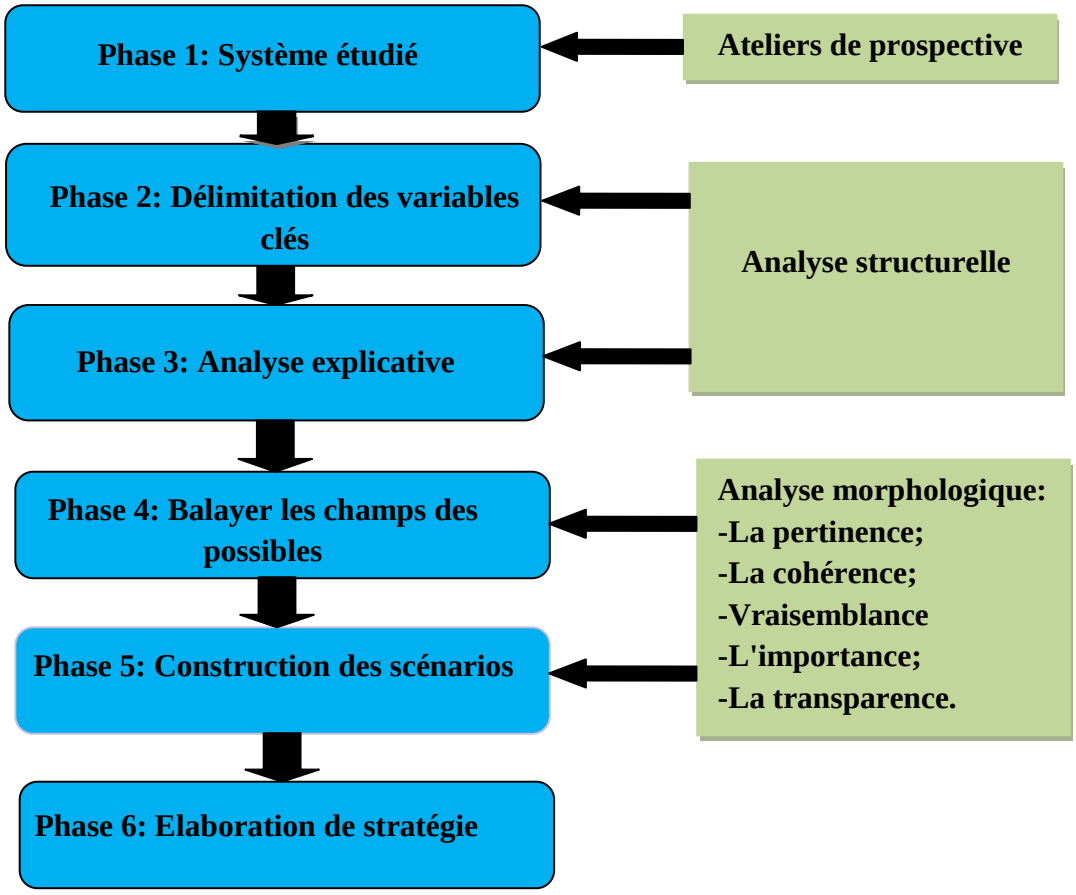


Figure 4.1: Méthode des scénarios selon Godet (1991) (Ouahab A, 2015), (Godet M, 2007).

4.4.1. Délimitation du système

La délimitation du système comprend essentiellement les points suivants :

- le sujet et l'horizon temporel de l'étude ;
- les attendus précis ;
- le calendrier pour atteinte l'objectif ciblé.

4.4.2. Représentation dynamique du système

La construction de scénarios débute par une connaissance de la situation étudiée. Il s'agit de déterminer les facteurs susceptibles d'influencer fortement l'avenir. Cette phase repose sur l'analyse structurelle du système prospectif. Elle vise à identifier les variables clés (existantes et prospectives) sur lesquelles va s'appuyer l'étude.

4.4.3. Simulation rétrospective et prospective relative aux variables du système

Cette étape permet, d'examiner les évolutions possibles des variables clés identifiées. Il s'agit également de tracer les variations rétrospectives et prospectives de chacune d'entre elles. L'objectif de cette phase est d'établir une représentation dynamique du système.

4.4.4. Balayage du champ des possibles et la réduction de l'incertitude

Les variables clés étant identifiées, les jeux d'acteurs analysés, on peut repérer les futurs possibles par une liste d'hypothèses traduisant par exemple le maintien d'une tendance, ou au contraire sa rupture. On peut faire ici appel à l'analyse morphologique pour décomposer le système étudié en dimensions essentielles et étudier les combinaisons possibles de ces différentes dimensions, combinaisons qui constituent autant d'images possibles du futur. À l'aide des méthodes d'experts, on pourra ensuite réduire l'incertitude en estimant les probabilités subjectives d'occurrence de ces différentes combinaisons ou des différents événements clés pour le futur (Godet M, 2007)

4.4.5. Construction de scénarios

La construction de scénarios a pour objectif d'élaborer quelques scénarios d'évolution du système de variables. Il s'agit d'une analyse morphologique qui consiste à :

- balayer des futurs possibles en construisant des scénarios de leurs évolutions sur la base des combinaisons de variables retenues ;
- réduire les sensibilités en testant l'effet de modifications des variables sur l'ensemble du système.

4.4.6. Élaboration de stratégie

Cette phase a pour objectif de passer à l'action stratégique pour parvenir aux résultats souhaités au préalable. Il convient alors de déterminer, comment on utilise concrètement ces leviers pour atteindre le but recherché. Cette étape permet :

- de clarifier des enjeux stratégiques ;
- d'identifier des leviers d'action ;
- de construire un dispositif d'observation du sujet étudié, utile à la fois à la compréhension des dynamiques en cours et à l'éventuelle évaluation des politiques ou des stratégies élaborées à partir de l'étude prospective (Ouahab A, 2015).

4.5. Techniques de la modélisation des consommations énergétiques

Les approches de la consommation d'énergie dans le secteur résidentiel puisent généralement leurs fondements conceptuels sur la modélisation des choix énergétiques et la substitution énergétique. Ces approches se focalisent avant tout sur des facteurs techniques, économiques et démographiques (PIB, prix de l'énergie, technologie, efficacité énergétique, population, pouvoir d'achat, etc.) (Dabat M.H, 2014). Les facteurs déterminants de la consommation d'énergie se révèlent nombreux et leur causalité est souvent complexe. Le choix d'un modèle global est nécessaire pour estimer l'impact technico-économique lors de l'adoption d'une politique énergétique. Il existe différentes techniques de modélisation utilisée dans la quantification des consommations énergétiques dans le secteur résidentiel (Ouahab A, 2015).

Swan et al. (2009) identifient deux techniques fondamentales de modélisation, utilisées dans l'estimation des consommations d'énergie et les émissions de CO_2 dans le secteur résidentiel : les approches top-down et bottom-up. La terminologie est en référence à la position des données d'entrées par rapport au secteur du logement. Les modèles « Top down » ont pour données d'entrée les consommations totales du secteur résidentiel et des données complémentaires qui caractérisent les consommations de l'ensemble du secteur. Les modèles « Bottom-up » calculent les consommations énergétiques d'une habitation ou d'un ensemble de maisons puis par agrégation celle d'une échelle supérieure.

Les différences fondamentales qui existent entre les deux modèles (top down et bottom up) ont entraîné un intérêt croissant pour le développement de méthodologies hybrides permettant de combiner les avantages des deux approches (figure 4.2) (Reed M et al., 2006).

4.5.1. Modèles top-down ou macroéconomiques (approche descendante)

L'approche « top-down» (descendante) est pour sa part apparue vers la fin des années 1960 et au début des années 1970 (Deniger M. A, 2012). Ces modèles s'attachent à expliciter les liens entre l'énergie et l'activité économique. Les techniques employées s'appuient sur différentes disciplines économiques : macroéconomie, économétrie, microéconomie. L'appellation « Top-down » traduit une perception du système énergétique à partir d'un nombre réduit de variables économiques agrégées (Assoumou E, 2006).

L'approche top down considère le secteur résidentiel comme un puits énergétique et ne distingue pas les consommations individuelles. Ces modèles déterminent l'effet de certain

changement à long ou à court terme sur la consommation énergétique du secteur résidentiel. Les variables souvent utilisées sont des indicateurs macroéconomiques (PIB, taux d'emploi, etc.), les conditions climatiques, le taux de construction et de démolition, et les estimations du nombre d'appareils domestiques dans les logements. Selon Swan et al., 2009, il existe deux groupes de modèles top down : économétrique et technologique (figure 4.2). Le modèle économétrique est basé principalement sur des variables économiques, comme le prix de l'énergie ou des appareils électrodomestiques et les revenus des ménages. Le modèle technologique s'appuie sur les caractéristiques générales du parc de logements, telles que les propriétés technologiques des appareils ménages et tel que le taux d'équipement des ménages, pour déterminer la consommation d'énergie. Certains modèles utilisent des techniques des deux groupes à la fois.

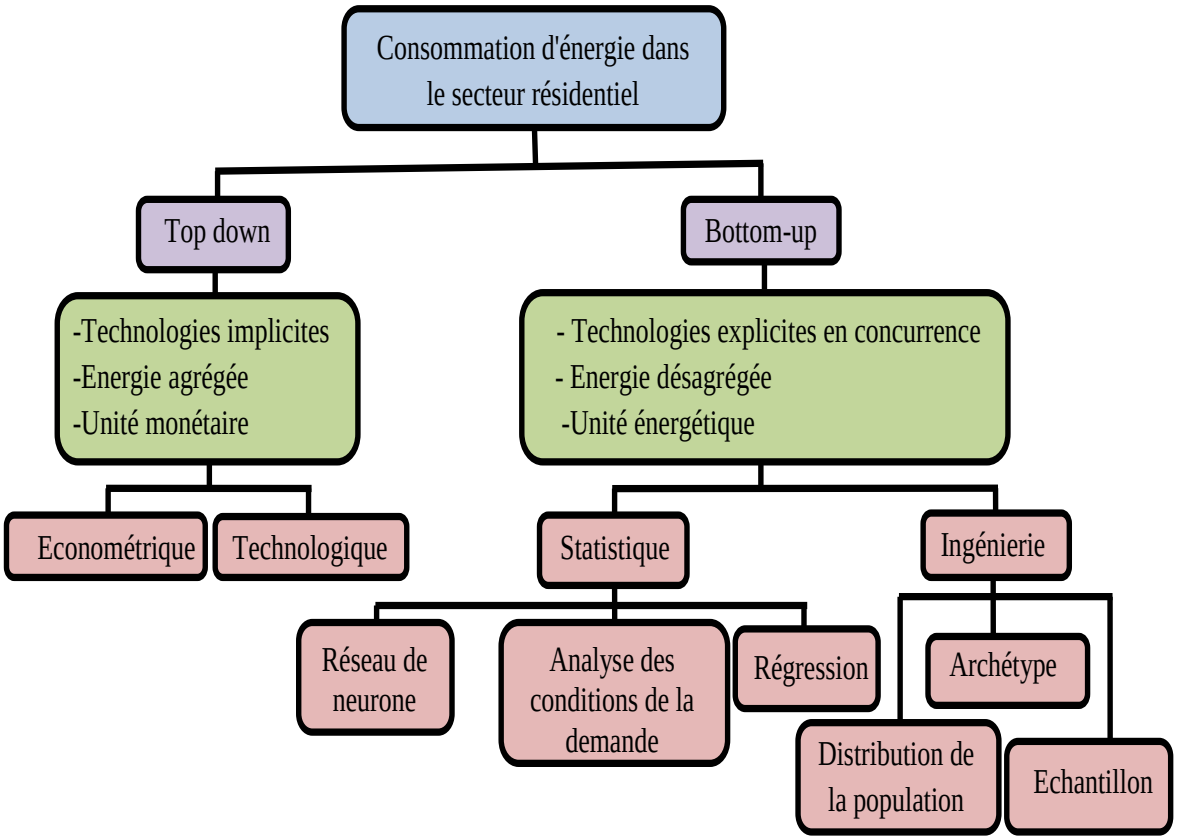


Figure 4.2: Techniques de modélisatios de la consommation d'énergie dans le secteur résidentiel (Swan et al., 2009).

Les points forts de cette approche top down sont une accessibilité simple aux données et une possibilité d'intégrer la consommation de nouveaux logements lorsque le taux de pénétration reste faible. Les inconvénients sont une impossibilité d'intégration de nouveaux logements

lorsque le taux de pénétration devient important, les progrès technologiques ne peuvent pas être pris en compte.

Le modèle top-down s'appuie essentiellement sur les données historiques pour estimer la consommation d'énergie. Ceci constitue un inconvénient, et ce, malgré le recours à technologique. L'approche top-down montre là son incapacité à modéliser le progrès discontinu de la technologie (Swan et al., 2009). De plus, le manque de détails relatifs à la consommation finale par type de logement ou par poste de consommation est une difficulté supplémentaire pour cibler les facteurs agissant sur l'accroissement de cette consommation. On peut ainsi conclure que ce type de modélisation montre une autre limite dans la détermination de facteurs clés qui pourraient intervenir dans la baisse de la consommation d'énergie dans le secteur résidentiel.

4.5.2. Modèles bottom-up ou technologiques (ascendante)

L'approche *bottom-up* est pour sa part apparue vers la fin des années 1970 et au début des années 1980. Elle fut présentée comme une solution alternative à l'approche *top-down* (Deniger M. A. 2012). Elle englobe toutes les techniques qui utilisent des données d'un niveau hiérarchique inférieur à celui de l'ensemble du secteur résidentiel. Ils peuvent rendre compte des consommations d'une habitation ou d'un ensemble de logements. Ces résultats sont ensuite extrapolés à l'échelle supérieure en considérant que l'échantillon étudié est représentatif de l'ensemble. Il existe deux techniques appliquées dans la modélisation bottom-up ont été développées. Le choix d'une technique est lié essentiellement au type et à la structure de données disponibles : statistiques ou basées sur la physique du bâtiment. Cela signifie qu'à partir d'un tel paramétrage du type de valeurs d'entrée et de la conception de la structure du modèle, on peut définir la technique qui correspond au modèle bottom-up (Ouahab A, 2015).

4.5.2.1. Technique statistiques

La méthode statistique est basée essentiellement sur les données historiques pour identifier la relation entre la demande en énergie finale et la production. Cette technique s'appuie, pour construire ses bases de données, sur les informations fournies par les facturations énergétiques des clients. Les modèles statistiques ne sont pas basés sur une connaissance des lois régissant physiquement les liens entre les consommations d'énergie et certaines caractéristiques des ménages et de leur environnement. Ils se « contentent » de corréler les consommations énergétiques observées (à l'aide des factures énergétiques des ménages ou plus rarement de

mesures in situ) à une description des ménages et de leur environnement. Cette description ne présente pas de contrainte sur la manière dont ces éléments sont qualifiés, ce qui permet par exemple à ces modèles de représenter la corrélation entre le revenu des ménages et leur consommation énergétique, ce qui est impossible dans un modèle ingénieur. Les modèles statistiques se distinguent entre eux par le formalisme des corrélations pouvant être représentées par les modèles. Les auteurs différencient la demande d'analyse conditionnelle des méthodes de régressions et des réseaux de neurones. Cependant, la pertinence du choix de ces trois catégories par les auteurs peut être questionnée. En effet, l'analyse de demande conditionnelle est elle-même une technique de régression, et les réseaux de neurones ne sont pas la seule méthode statistique d'estimation n'utilisant pas de régression (Allibe B, 2012).

4.5.2.2 Approche par ingénierie ou par caractéristiques physiques du bâtiment

La méthode d'ingénierie repose sur des données caractérisant les logements qui permettent de calculer l'utilisation finale de l'énergie grâce aux caractéristiques physiques du bâtiment. Cette approche de modélisation utilise des méthodes de calcul énergétique pour calculer la consommation d'énergie d'un échantillon de logements, représentatif, qui sera ensuite extrapolée pour estimer la consommation totale d'énergie du parc dans son ensemble. À l'inverse de nombreuses autres approches de modélisation, l'approche par l'ingénierie peut estimer pleinement la consommation d'énergie sans aucune information quant à l'historique de la consommation d'énergie.

L'utilisation de la méthode d'ingénierie exige néanmoins la saisie d'informations composées de données quantitatives sur la physique du bâtiment et des variables spécifiques à ce dernier, telles que :

- la qualité de l'espace ;
- les systèmes de chauffage et leurs caractéristiques ;
- des informations sur les différents éléments composant le logement (murs, toiture, plancher, fenêtres, portes) et leurs caractéristiques thermiques (valeurs $U_{bât}$) ;
- la température interne ;
- la température externe spécifique à chaque zone climatique ou géographique ;
- les différents appareils électroménagers ventilés par type de consommation d'énergie et rendement de système ;
- le nombre d'occupants ;

- les apports d'énergie internes et externes, etc.

La combinaison de la physique du bâtiment et les données empiriques issues d'enquêtes de logement, ainsi que des hypothèses sur le fonctionnement des bâtiments donnent aux modélisateurs des outils pour estimer la consommation d'énergie dans les logements dans le passé, le présent et le futur. En développant divers scénarios, les modèles bottom-up semblent suffisamment robustes pour évaluer l'impact des mesures spécifiques de réduction de carbone sur la demande globale d'énergie. C'est la raison pour laquelle cette méthode est couramment utilisée pour identifier les mesures technologiques et fournir aux décideurs des estimations sur l'efficacité des politiques énergétiques.

Il semble qu'en revanche, la principale limite de la méthode d'ingénierie est celle du manque de transparence dans la quantification de l'impact des facteurs comportementaux des occupants sur la consommation d'énergie. De plus, ce type d'approche nécessite un certain nombre de données détaillées et précises, démographiques ou technologiques, concernant le parc, qui s'avèrent parfois difficiles à recueillir, ce qui constitue donc un véritable obstacle à la réalisation de cette méthode de modélisation. Précisons en outre que cette méthode fournit des résultats basés sur des calculs théoriques (Ouahab A, 2015).

4.5.3. Avantages et limites des approches de modélisation bottom-up et top-down

Le tableau 4.1 présent les avantages et limites des approches de modélisation bottom -up et top-down (Swan et al., 2009) **.**

Tableau 4.1. Avantages et limites des approches de modélisation bottom -up et top-down

Caractéristiques	bottom -up	top-down
Avantages	-Décrit les technologies actuelles et prospectives en détail -Utilise les données physiquement mesurables -Mise en action de stratégies pour viser plus efficacement une cible de consommation -Evalue et quantifie l'impact de différentes combinaisons de	-Se focalise sur l'interaction entre le secteur de l'énergie et l'ensemble de l'économie. -Evite les descriptions détaillées de la technologie. -Modélise les relations entre les différentes variables économiques et la demande d'énergie.

	technologies sur la consommation d'énergie.	-Modélise l'impact des différents avantages sociaux des politiques énergétiques et des scénarios d'émission -Utilisation de données économiques agrégées
Limites	-Faible description des interactions du marché. -Manque de relations entre l'utilisation de l'énergie et 'activité macroéconomique. -Exige une grande quantité de données techniques. -Ne peut pas déterminer le comportement humain dans le modèle, mais pas d'hypothèses externes.	-Dépend des interactions passées de l'économie d'énergie pour prévoir les tendances futures. -Manque du niveau détail technologique. -Moins approprié pour l'examen des politiques spécifiques à la technologie.

4.5.4. Modèles hybrides

Les modèles hybrides ont été développés depuis les années 1990 pour essayer de tirer partie des avantages respectifs de différentes familles de modèles. Ces hybridations peuvent être de natures sensiblement différentes, allant de la représentation d'une des composantes Bottom up ou Top down par un module élémentaire à l'intégration poussée de ces deux composantes dans la conception même du modèle (Allibe B, 2012).On peut trouver plusieurs manières de concilier les deux techniques.

- Tout d'abord, prolonger vers le bas un modèle macro sectoriel par un modèle énergie, décrivant de façon détaillée les technologies, mais cette opération est limitée par la lourdeur de la mise en œuvre.
- Pousser vers le haut un modèle bottom-up en y ajoutant un module macroéconomique agrégé (c'est le cas par exemple de MARKAL, qui a été prolongé par un module macro économique très agrégé).
- Enfin, il y a la possibilité de faire dialoguer deux approches ou plus, de façon centralisée, et organisant un linkage par les itérations.

L'ambition des modèles hybrides consiste à combiner une représentation détaillée des technologies et l'usage de l'énergie avec une représentation détaillée des interactions entre le système énergétique et le reste de l'économie (Guellil M.S.2016.)

Les modèles hybrides ont été développés pour mieux intégrer les facteurs macroéconomiques dans les modèles technico-économiques. Par exemple, MARKAL-MACRO, NEMS et ISTUM (devenu CIMS) sont des modèles technologiques liés à des modules macroéconomiques simples. Par ailleurs, TIMES a été étendu pour mieux tenir compte des rétroactions économiques sur le système énergétique, grâce à l"introduction d"élasticité-prix pour les services énergétiques Enfin, LEAP (Long range Energy Alternatives Planning System), combine différentes approches de modélisation : technico-économique, simulation, macro-économique et techniques de comptabilité (Gouareh A, 2017).

4.6. Application des modèles à l'étude prospective de la demande d'énergie du secteur résidentiel à l'échelle internationale

Il y a un intérêt croissant pour la réduction de la consommation d'énergie et émission des gaz à effet de serre associés dans tous les secteurs de l'économie. Le secteur résidentiel est un consommateur important d'énergie dans chaque pays, et donc la modélisation et la prévision de la consommation d'énergie dans le bâtiment sont essentielles pour l'économie d'énergie et de réduction des émissions de gaz à effet de serre. Il existe de nombreux travaux de modélisation énergétique dans le secteur résidentiel. Citons ici quelque des études :

Chaturvedi V et al., Ont présenté un modèle estimer de la demande d'énergie dans le secteur du bâtiment à long terme, pour produire des scénarios de l'évolution de la demande d'énergie du secteur du bâtiment indiens jusqu'à la fin du siècle. Les résultats soutiennent l'idée que: pendant que l'Inde évolue les niveaux de revenu par habitant augmentent dans pays, son secteur du bâtiment évoluera en grande partie pour ressembler à ceux des pays actuellement développés, quoiqu'avec des caractéristiques relatives aux conditions climatiques (chauffage de domination de refroidissement et encore plus avec le changement climatique), sur les préférences de carburant liées au présent (par exemple, une préférence pour le gaz pour la cuisson), et les vestiges du passe sur son développement (exemple des pauvres ruraux qui emploient des quantités substantielles de biomasse traditionnelle) (Chaturvedi V et al., 2014).

Mattinen et al., ont présenté une approche ascendante (bottom-up) pour l'estimation de la consommation d'énergie et des émissions de gaz à effet de serre dans le secteur résidentiel dans la zone à Tampere, Kaukajarvi. Le calcul est basé sur des données détaillées concernant le bâtiment existant. Le but est de mesurer et de donner des résultats sur énergie et l'émission de Gaz à effet de serre basée sur l'endroit et les caractéristiques de chaque propriété. L'analyse a pu être faite en principe pour la totalité de la Finlande. Cependant, afin de faire une analyse détaillée des bâtiments, et valider les de données d'entrée de commande. Le SIG est utilisé pour la visualisation des résultats d'énergie et d'émission. Les résultats obtenus fournissent des informations significatives et détaillées au sujet de l'utilisation de l'énergie et des émissions de gaz à effet de serre dans le bâtiment. L'information peut par exemple être employée dans diverses analyses de point chaud. En plus, des impacts des mesures d'efficacité énergétique des changements comportementaux peuvent être évalués. Ces types d'analyse peuvent être utiles pour les décideurs politiques afin de donner la priorité à des actions efficaces, comme les rénovations l'application dans le secteur résidentiel (Mattinen et al., 2014).

Dagdougui et al., ont proposé un modèle de décision dynamique pour la gestion de l'énergie d'un ménage. Le modèle peut définir la gestion optimale d'écoulements d'énergie dans un bâtiment caractérisé par un mélange des ressources énergétiques renouvelables (solaire, biomasse, vent) pour satisfaire différentes demandes (électrique, chauffage et eau). Le modèle a été appliqué à un ménage situé au capo Vado (région de la Ligurie). Des résultats optimaux pour satisfaire toutes les demandes énergétiques sont trouvés pendant un jour d'essais avec la présence/absence du système de stockage. D'ailleurs, une analyse au sujet des émissions évitées est rapportée et l'importance d'avoir un système de stockage est démontré également sous ce point de vue. Le modèle de décision développé peut également être employé pour la gestion en temps réel, par une approche qui est adoptée pour la solution dynamique de modèle de décision.

Il convient de noter que, dans le cas de l'absence d'un système de stockage de l'énergie, il n'y a aucune équation disponible sur l'énergie qui varie à chaque intervalle, le problème d'optimisation peut être étudie à chaque intervalle d'une manière séparée.

L'inclusion du modèle de décision dynamique développé dans un système d'aide à la décision qui peut permettre à l'utilisateur d'agir sur l'un au l'autre avec les modèles mathématiques pourrait être utile pour la gestion de l'énergie du ménage (Dagdougui et al., 2016).

Le bâtiment à énergie positive c'est un bâtiment producteur d'énergie qui dépasse le niveau de zéro énergie : il produit globalement plus d'énergie qu'il n'en consomme. Il peut être raccordé à un réseau de distribution de l'électricité vers lequel il exporte son surplus de production. Historiquement, les bâtiments à énergie positive peuvent être considérés comme une extension du concept de bâtiments passifs qui à été développé depuis les années 1970 et dont de nombreux bâtiments de démonstration ont été construits autour du monde.

En 1992, l'institut Fraunhofer de recherche solaire européen (ISE) a entrepris l'exploitation de la maison solaire autosuffisante de Fribourg (ISE, 2000); ceci peut être considéré comme le premier bâtiment à énergie positive. Pendant trois ans, de 1992 à 1995, la maison a été occupée par une famille de deux adultes et un enfant et a démontré que le soleil peut fournir à une maison toute l'énergie dont elle a besoin, même dans le climat d'Europe centrale. Pendant cette période, la maison n'était pas raccordée au réseau électrique et il n'y avait pas d'autre source d'énergie non solaire; Le succès du projet reposait sur l'hydrogène produit par l'énergie solaire comme forme de stockage d'énergie pour l'électricité et la chaleur et sur une pile à combustible comme centrale de cogénération miniature.

En 1998, une maison à énergie positive a été construite à Lakeland en Floride, un bâtiment résidentiel expérimental dénommé «PVRES» (résidence photovoltaïque à haute efficacité énergétique); construit avec un plan conventionnel (les deux avaient le même plan d'étage) qui a joué le rôle de contrôle du projet. La maison «PVRES» présente des niveaux d'isolation thermique plus élevés, un système de toiture réfléchissante blanche, un chauffe-eau solaire et des appareils électroménagers efficaces, une thermopompe à haute efficacité et un système photovoltaïque (Florida Solar Energy Center, 2007). Même si le projet n'a pas atteint le bilan annuel zéro énergie (les besoins annuels en énergie en termes d'énergie finale ont été couverts à 75%), il a montré que la demande qui coïncide au pic d'utilité nette était pratiquement nulle et est devenue le produit phare du programme.

En 2005, Eric Doub et sa société Ecofutures ont construit une autre maison de 426 m^2 à consommation énergétique nette zéro (Solar Harvest). La première maison zéro énergie de la

ville de Boulder (Colorado, États-Unis). Le concept est une combinaison de caractéristiques de conception solaire active et passive avec une forte isolation thermique, des vitrages et des fenêtres haute performance et un équipement hautement efficace. Tous les appareils de la maison sont électriques depuis 2007, tous les besoins en électricité étant couverts par des panneaux photovoltaïques, tandis que le chauffage des locaux et l'eau chaude sanitaire sont fournis par des capteurs solaires thermiques. De plus, il est doté d'un système de ventilation à récupération de chaleur (VRC) prolongé et d'un tuyau en PVC enfoui sous terre pour le préchauffage thermique saisonnier et le pré-refroidissement de l'air (Doub E, 2009).

En 2006, une maison à énergie positive a été construite de surface de 212 m^2, cette maison est situé à Flieden, Hessen, en Allemagne. La construction incorpore des niveaux élevés d'isolation, des fenêtres triples et une ventilation mécanique contrôlée par un système de récupération de chaleur tandis que les besoins en énergie sont couverts par l'utilisation combinée de capteurs solaires, de panneaux PV et d'une éolienne (Ricardo P.C, 2009).

Noguchi et al., ont construit en 2007, une maison 'Eco Terra' située à Eastman, Québec, Canada c'est une maison à énergie positive de 140 m^2 pour économiser l'énergie et minimiser les impacts négatifs sur l'environnement c'est la première maison à consommation énergétique nette zéro du Canada (figure 4.3). La maison dispose d'une enveloppe étanche à l'air avec de hauts niveaux d'isolation, trois fenêtres à faible émissivité et des appareils à haut rendement. Il intègre des technologies de chauffage conventionnelles telles que la pompe à chaleur géothermique, le système photovoltaïque intégré au bâtiment (Noguchi, et al., 2008).

Figure 4.3: Maison ÉcoTerra à Eastman (Noguchi, et al., 2008).

Marszal et al., ont déterminé le coût du cycle de vie des systèmes des énergie renouvelable sur site et hors site, et définit la relation du coût optimal entre l'efficacité énergétique et la production d'énergie renouvelable de ces systèmes pour une nouvelle construction de bâtiments à énergie positive à plusieurs étages. Les résultats sont opposés pour les options d'approvisionnement renouvelable hors site, et donc il est plus rentable d'investir dans des technologies d'énergie renouvelable plutôt que dans l'efficacité énergétique (Marszal et al., 2012).

Alajmi et al., ont démontré la possibilité de convertir un bâtiment public de consommateur d'énergie inefficace en un bâtiment à énergie positive. Cette tâche est réalisée grâce à des mesures d'efficacité énergétique rentables et l'intégration des systèmes d'énergie solaire. Trois scénarios qui utilisent la même surface de toit sont proposés pour convertir le bâtiment en un bâtiment à énergie positive. Les deux premiers scénarios utilisent uniquement le système PV, avec le deuxième scénario intègre le remplacement des refroidisseurs actuels par des refroidisseurs plus efficaces tandis que le troisième scénario combine à la fois les systèmes de refroidissement PV et solaire. Le premier scénario atteint l'énergie positive sur une base annuelle seulement, alors que les autres scénarios atteignent en un bâtiment à énergie positive sur une base annuelle et mensuelle. Le deuxième scénario se distingue par des avantages par rapport

aux autres scénarios en matière d'économie d'énergie, d'interaction avec les réseaux énergétiques mis en place.

La réalisation d'efficacité énergétique mises en œuvre et proposées permettent d'économiser environ 1480 MWh sur la consommation du bâtiment et évite environ 1021 tonnes les émissions de CO_2 chaque année avec des périodes de récupération allant de la moitié à 3 ans pour les mesures envisagées. L'émission annuelle de CO_2 évitée d'environ 748 tonnes est atteinte pour le premier ou le deuxième scénario et environ 848 tonnes pour le troisième scénario avec des périodes de récupération de 14.1, 11.8 et 15 ans pour les trois périodes considérées (Alajmi A et al., 2016).

4.7. Application des modèles à l'étude prospective de la demande d'énergie du secteur résidentiel à l'échelle nationale

La maîtrise de l'énergie connaîtra en Algérie une dynamique nouvelle dans les prochaines décennies. En effet, la mise en place récente des groupes de réflexion sur la politique des énergies renouvelables et de l'efficacité énergétique constitue, de notre point de vue, un signal fort des pouvoirs publics pour le développement, à grande échelle, aussi bien des énergies renouvelables que de l'efficacité énergétique.

L'étude prospective sur la demande d'énergie est appelée à jouer un rôle important dans le contexte énergétique national, afin de renforcer la connaissance du système d'information et pouvoir ainsi analyser l'évolution de la consommation d'énergie à long terme. Ces actions visent à asseoir le concept d'efficacité énergétique qui s'impose aujourd'hui et d'élaborer une stratégie corrective du mode de consommation pour chaque secteur de l'activité économique, notamment, dans le secteur résidentiel.

Le programme vise à encourager la mise en œuvre de pratiques et de technologies innovantes, autour de l'isolation thermique des constructions existantes et nouvelles. Des mesures adéquates seront prévues au niveau de la phase de conception architecturale des logements. Il s'agit également de favoriser la pénétration massive des équipements et appareils performants sur le marché local, notamment les chauffe-eau solaires et les lampes économiques: l'objectif étant d'améliorer le confort intérieur des logements en utilisant moins d'énergie. La mise en place d'une industrie locale des isolants thermiques et des équipements et appareils performants (chauffe-eau solaires ; lampes économiques) constitue l'un des atouts pour le

développement de l'efficacité énergétique dans ce secteur. Globalement, c'est plus de 30 millions de TEP qui seront économisées, d'ici 2030 répartie comme suit:

1- Isolation thermique: l'objectif est d atteindre un gain cumulé évalué à plus de 7 millions de TEP;
2- Chauffe-eau solaire: l'objectif est de réaliser une économie d'énergie à plus de 2 millions de TEP;
3- Lampe basse consommation (LBC) : Les gains en énergie escomptés, à l horizon 2030 sont estimés à près de 20 millions de TEP;
4- Eclairage public : l objectif est de réaliser une économie d'énergie de près de un million de TEP, à l horizon 2030 et d alléger la facture énergétique des collectivités (APRUE, 2015).

Beaucoup de travaux ont étudié la modélisation de la consommation d'énergie du secteur résidentiel en Algérie afin de limiter les consommations d'énergie dans les bâtiments et réaliser le confort thermique. Dans ce qui suit, on présentera quelques études.

Ouahab développe des méthodes d'analyse quantitative pour réduire la consommation énergétique et ralentir, voire stabilisé, les émissions de CO_2 dans le secteur résidentiel en Algérie à l'horizon 2050. Il s'agit de développer un modèle de prospectif capable de simuler différents leviers d'efficacité énergétique, afin de pouvoir faire perdurer les ressources actuelles en respectant les engagements environnementaux, et d'offrir, in fine, un éclairage plus précis quant aux impacts des politiques énergétiques sur les prochaines années. Les principaux résultants sont:

Le niveau de détail des consommations, à l'image du modèle bottom-up, lorsqu'il est couplé à un modèle dynamique du parc de logement, permet de renforcer la robustesse de notre modèle et de limiter les incertitudes des résultats fournis en matière de besoins énergétiques et d'émissions de CO_2.

Le modèle dynamique du parc de logements a tout d'abord permis de visualiser que les effets mécaniques de l'accroissement du nombre des ménages et de la nucléarisation des ménages collectifs sont à la source d'un renforcement de la pression foncière. Ce double effet se traduit par un triplement de la taille du parc, soit 18 millions de logements à l'horizon 2050.
L'impact de l'accroissement de la taille du parc du logement sur la consommation d'énergie a pu être quantifié. Celui-ci se traduit par une forte augmentation des consommations énergétiques, qui serait de l'ordre de 413,4 TWh/an, l'équivalent de 200 kWh/m²/an selon le scénario

tendanciel. L'augmentation des consommations s'explique, d'une part, par l'intensité du service consommé, dont l'importance serait liée à l'effet de rattrapage des ménages en équipements électroménagers (niveau de satisfaction de 100 % visé en 2050), et, d'autre part, en une amplification des besoins de chauffage et de refroidissement induite par le niveau d'isolation de l'enveloppe bâtie, notamment dans le segment des maisons individuelles.

Le modèle a permis de tester le potentiel de pénétration de nouvelles technologies sur la réduction des consommations/émissions. À ce titre, il a montré que l'atteinte de l'objectif de réduction des consommations/émissions s'appuie sur deux leviers technologiques : le renforcement de l'isolation de l'enveloppe bâtie dans le parc des logements neufs, tout en réhabilitant massivement le stock existant, ainsi que l'usage d'appareils électroménagers à faible consommation dans le parc du neuf, en renouvelant progressivement dans le même temps les anciens appareils dans le parc existant.

Le modèle a révélé que la mise en place de ces leviers pour le scénario du bâtiment à basse consommation pourrait amener à réduire drastiquement les consommations et les émissions à l'horizon 2050. En effet, la fusion de ces efforts permettrait d'atteindre un facteur de presque de 2.8 pour les consommations énergétiques, qui seraient alors de l'ordre de 145.2 TWh/an. Ce niveau des consommations permettrait d'atténuer significativement les émissions, qui s'élèveraient à 41.2 $MtCO_2$ (contre 112.5 $MtCO_2$ dans le scénario tendanciel). Il est intéressant de noter que ramener le niveau de performance moyenne de l'ensemble du parc sous la barre des 70 kWh/m²/an dans le scénario BBC, en stabilisant les émissions unitaires à 0.8 tCO_2/habitant dans le secteur résidentiel, constituerait un résultat qui correspond aux ambitions de ce travail (Ouahab, 2015).

Berrached L est élaboré d'un outil de calcule de la demande d'énergie à long terme suivi d'un scénario de référence à l'horizon 2030. En plus, cette étude prospective qui englobe tous les secteurs d'activités économiques algériens propose un scénario volontariste dans le cadre de maitrise d'énergie et développement durable. Il est montré que la demande d'énergie finale en Algérie à l'horizon 2030 augmentera avec l'évolution démographique et économique constatés dans tous les secteurs.

Le scénario de référence décrit la situation énergétique de l'Algérie à l'horizon 2030. Passant de 23 Mtep en 2008 à 50 Mtep en 2030. Pour 2008, le secteur du transport est majoritaire avec 41%, suivie du secteur résidentiel avec 23.4% et l'industrie avec 20% contre

28.54%,34.9 et 22.56% respectivement à l'horizon 2030. C'est fortes demande d'énergie génèrent 79.8 $MTCO_2$ en 2008 est 154.3 $MTCO_2$ en 2030.

Le scénario volontariste ou scénario d'efficacité énergétique qui consiste à intervenir sur tous les secteurs d'activité avec des actions de maitrise d'énergie dégage un potentiel d'économie d'énergie à l'horizon 2030 de 10 Mtep, répartie comme suit 81.34 Ktep en 2015. Avec 3.4 Mtep d'économie d'énergie totale et 2.6 Mtep pour le résidentiel et l'industrie. Ces actions d'efficacité énergétique, non seulement économisent de l'énergie, mais évitent environ 39 $MTCO_2$ proportionnelle au potentiel d'économie d'énergie à l'horizon 2030 (Berrached L, 2011).

Kaabeche A et al., ont présenté une méthode de dimensionnement optimal du générateur photovoltaïque et du banc de batteries dans un système hybride de production d'électricité (éolien-photovoltaïque) totalement autonome. Pour une charge et une probabilité de perte d'énergie données sous le critère d'un prix minimum du système, un nombre optimal de batteries et de modules photovoltaïques a été calculé. Ainsi, à partir de données horaires de l'irradiation solaire, de la température ambiante et de la vitesse du vent, nous avons calculé la puissance horaire produite par l'aérogénérateur et par le générateur photovoltaïque sur une période d'analyse d'une année. Ces données sont issues de mesures au centre de Bouzaréah. Un profil de consommation type a été adopté. Il correspond au profil rencontré généralement dans les sites isolés. Les résultats montrent l'intérêt d'introduire un aérogénérateur dans un système photovoltaïque autonome. Cet intérêt se manifeste par la réduction de la taille du générateur photovoltaïque et de la capacité de stockage, réduisant ainsi le coût total du système (Kaabeche A et al., 2006).

4.8. Conclusion

Dans un premier temps, Ce chapitre vise à mettre en évidence sur les modèles de prospective énergétique existants. Dans un deuxième temps à analyser les forces et les faiblesses de chaque modèle. On a vu ensuite qu'outre les méthodes de modélisation bottom-up et top-down, il existe aussi un nombre important d'approches de modélisation hybrides. Tous ces modèles ont bien entendu leurs avantages et leurs limites. Dans cette étude, nous recourons à l'approche bottom-up puisque qui présente plusieurs avantages clés qui en font certainement l'outil le plus approprié. Il se présente comme un modèle robuste conçu pour répondre aux besoins multiples et évolutifs des politiques énergétiques, notamment dans le secteur résidentiel.

Chapitre 5

Prospective de la demande énergétique à l'horizon 2040

5.1. Introduction

Le secteur résidentiel correspond environ de 16 à 50% des consommations mondial de l'énergie totales (Ouahab A, 2015). Au niveau national, la consommation d'énergie résidentielle représentait 33% de la consommation d'énergie totale et émet en moyenne 21 % des gaz à effet de serre. Il est à ce titre considéré comme la deuxième source d'émissions de CO_2 après le transport. Les raisons qui ont conduit à une augmentation de la demande d'énergie sont une augmentation substantielle de la population et du logement, augmentant le nombre des équipements électriques dans chaque maison, l'utilisation d'appareils électriques non économiques tels que les lampes à incandescence et les climatiseurs bon marché, l'absence de sensibilisation et le manque de culture sur l'efficacité énergétique, le désir croissant des gens de se réconforter (Ghedamsi et al., 2016). Avec un accroissement attendu du nombre de populations et du logement qui sont les principaux facteurs de la consommation dans le secteur résidentiel. Les bâtiments disposent néanmoins d'un important potentiel d'économies d'énergie. Incité par cette situation, le gouvernement algérien met en place des leviers technologiques en faveur de l'efficacité énergétique dans le secteur résidentiel. Cependant, ces efforts risquent d'être inefficaces sans une vision prospective de l'évolution des consommations d'énergie (chauffage, refroidissement, eau chaude sanitaire et appareils électroménagers), à savoir, l'élaboration d'un modèle de prospective énergétique. A cet effet, nous essayerons dans ce chapitre de faire une prévision de la consommation d'énergie dans le secteur résidentiel algérien, en se basant sur un modèle de prévision ascendant (micro-économique) en combinaison avec des données statistiques provenant de différents organismes. Les besoins en énergie sont estimés pour deux scénarios, à savoir un scénario tendanciel ou de référence qui poursuit dans la même voie sans modification et ne prenne pas en compte les interventions futures des gouvernements, comme la mise en œuvre de futures politiques énergétiques ou climatiques, et un scénario alternatif (volontariste), lequel apportant des modifications dans les modes de consommation en introduisant de nouvelles voies d'économie et d'efficacité énergétique tels que l'intégration de l'éclairage avec des lampes à basse consommation, ainsi que les systèmes de climatisation utilisant comme source d'énergie le gaz naturel. Ce travail s'étend est borné à la période 2008-2040, cette dernière permettant d'envisager les opérations dans le parc de logements sur une longue durée.

5.2. Méthodologie et hypothèses

La consommation d'énergie du secteur résidentiel varie selon différents facteurs, tels que le climat, composition de ménage, revenu familial, fond de culture et le comportement humain, etc. Ce travail présente une approche ascendante (bottom-up) pour la modélisation et la prévision de la consommation d'énergie dans les secteurs résidentiels algériens jusqu'en 2040. Ce type des modèles énergétiques se base sur la combinaison des déterminants du secteur résidentiel avec des données statistiques pour calculer la consommation d'énergie (Ghedamsi R et al, 2015). Le point de départ pour développer les projections de la consommation d'énergie est établi par la demande d'énergie de différents usages finaux pour l'année de base (2008). La consommation d'énergie dans le secteur résidentiel inclut le chauffage, le refroidissement, l'eau chaude sanitaire (ECS) et les appareils électroménagers tels quels : cuisson, réfrigérateur, lave-linge, éclairage, téléviseur, etc. Pour estimer la demande d'énergie finale, il est nécessaire de déterminer l'utilisation d'énergie pour chacun de ses composants. Les facteurs déterminants de la demande d'énergie sont de nature démographique (population, nombre de ménages, etc.), donc la demande d'énergie du secteur est calculée en considérant la nature et les conditions de vie de personnes ainsi que les caractéristiques climatiques. Cela permet une meilleure représentation des besoins réels des individus, de leur style de vie, de même une définition plus adéquate des marchés potentiels des différentes formes d'énergie finale envisageables. Pour estimer la consommation d'énergie annuelle pour le conditionnement d'air (chauffage et refroidissement), les charges annuelles de chauffage et de refroidissement par unité de surface dans différentes régions (48 stations météorologiques) sont obtenues en utilisant la méthode de degrés-jours combiné avec un Système d'Information Géographique (SIG). Le SIG est utilisé pour développer un découpage du territoire algérien en différentes zones climatiques selon le coût annuel de la consommation d'énergie par unité de surface de mur, nécessaire pour le chauffage et le refroidissement, où on prend en considération le coût de l'électricité pour le refroidissement et le coût du gaz naturel pour le chauffage. La deuxième étape consiste à faire une projection de la demande en énergie finale jusqu'en 2040, en se basant sur des hypothèses socio-économiques (tirés à partir des rapports et des statistiques nationales) à travers deux scénarios (référence et volontariste).

La figure 5.1 représente l'organigramme du modèle d'évaluation de la consommation d'énergie dans le secteur résidentiel.

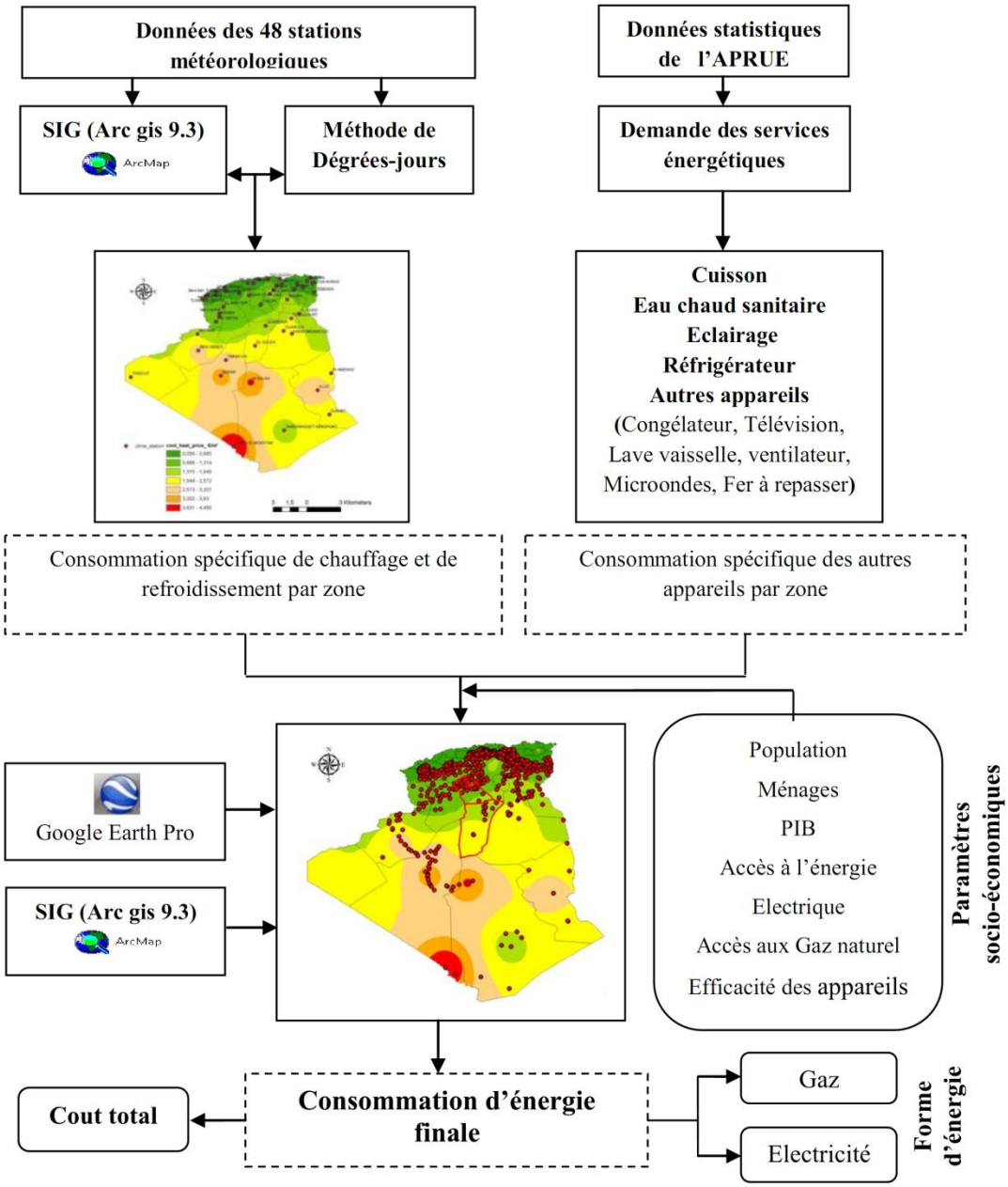


Figure 5. 1 : Organigramme du modèle d'estimation de la consommation d'énergie dans le secteur résidentiel.

5.2.1. Modélisation de la consommation d'énergie par type d'usage final

La demande d'énergie peut être classée en deux types de déterminants:

1- déterminant comportementaux: ce type n'est pas en relation avec le climat, mais lier au comportement humain. Il a une haute corrélation avec les habitudes, par exemple, cuisinière, four à micro-ondes, lave-linge, réfrigérateur, congélateur, télévision, lave-vaisselle, etc.

2- Déterminants physiques: ce type d'énergie consommée, par exemple, le chauffage, le refroidissement et l'éclairage, à une haute corrélation avec le climat et la conception des bâtiments, a une faible corrélation avec les habitudes des gens. Chaque variable de conception a une large gamme de valeurs ou de choix possibles. Le tableau suivant montre la dépendance de chaque demande d'énergie avec les variables de conception (Yao R, 2005).

Tableau 5.1. Dépendance de la demande d'énergie avec les variables de conception.

Demande d'énergie		Variables de conception
Chauffage du logement		Isolation thermique
		Inertie thermique
		Type de vitrage
		Facteur de forme
		Surface vitrée
		Orientation
Refroidissement du logement		Niveau d'une fuite
		Type de système de ventilation
Eau chaude sanitaire (ECS)		Efficacité des appareils
Eclairage		Efficacité de l'éclairage
Appareils domestiques		Efficacité du système de chauffage
Microgénération		Performance du dispositif de climatisation
		Efficacité de l'équipement de l'eau chaude sanitaire (ECS)
		Efficacité de PV ou WT

5.2.1.1. Demande d'énergie pour le chauffage et le refroidissement

La demande d'énergie pour le chauffage et le refroidissement de l'espace dépend des caractéristiques thermiques des matériaux de construction, l'orientation, la température intérieure et le climat local, etc (Yao R, 2005).

Dans cette étude un zonage climatique a été élaboré selon le critère du nombre de degrés-jours pour estimer les besoins énergétiques de chauffage et de refroidissement. Deux types de zonages ont été effectués : un zonage pour l'hiver (se chauffer) et un zonage pour l'été (se refroidie) en utilisant un réseau de plusieurs stations synoptiques réparties sur tout le territoire.

5.2.1.2. Méthode de degré-jours

La méthode de degrés-jours permet de réaliser des estimations les besoins énergétiques nécessaires pour le chauffage et le refroidissement dans un bâtiment. La méthode suppose que les besoins énergétiques d'un bâtiment sont proportionnels à la différence entre la température de base (température de confort thermique) et la température moyenne de l'air extérieure. Le nombre de degrés-jours de chauffage (HDD) et de refroidissement (CDD) est obtenu comme démontrent les équations suivantes (Kaynakli O, 2012) (Mourshed M, 2012) :

$$\mathrm{HDD} = \sum_{\mathrm{jours}} (\mathrm{T_b} - \mathrm{T_0})^{+} \qquad 5.1$$

$$\mathrm{CDD} = \sum_{\mathrm{jours}} (\mathrm{T_0} - \mathrm{T_b})^{+} \qquad 5.2$$

Avec

$\mathrm{T_b}$ est la température de base et $\mathrm{T_0}$ est la température moyenne journalière de l'air extérieur. Le signe plus (+) au-dessus des parenthèses indique que seulement des valeurs positives doivent être comptées. Les températures de base choisies du point de vue du confort thermique, on prend la température de base en saison d'hivernal et estival, 18 °C et 26 °C, respectivement.

5.2.1.3. Besoins thermiques annuels de chauffage et de refroidissement

Les besoins spécifiques thermiques (apports de chaleur en été et déperditions en hiver) des bâtiments se produisent la plupart du temps à travers les murs, la toiture, des fenêtres, et du sous-sol externes et par l'infiltration (Ozel M, 2011) (Ghedamsi R et al., 2016). Dans cette étude, seulement les pertes de chaleur à travers les murs externes sont considérées. Les pertes de chaleur annuelle pour le chauffage et le refroidissement par unité de surface de mur extérieure est donnée par (Daouas N, 2011):

$$\mathrm{Q_C} = 86400 \times \mathrm{HDD} \times \mathrm{U} \qquad 5.3$$

$$\mathrm{Q_r} = 86400 \times \mathrm{CDD} \times \mathrm{U} \qquad 5.4$$

Avec, U est le coefficient global de transfert thermique en w/m^2.k

$$U = 1/(\frac{1}{h_i} + \sum_{j=1}^{N} \frac{e_j}{k_j} + \frac{1}{h_0}) \quad 5.5$$

Avec, h_i et h_0 sont les coefficients de transfert de chaleur par convection entre l'air et les faces internes et externes de mur, sont respectivement égales à 10 et 20 W/m^2 K, respectivement (CNERIB, 2011), (Bolattürk A, 2006). e_j et k_j sont l'épaisseur et la conductivité thermique de la couche j, respectivement.

La consommation d'énergie annuelle pour le chauffage peut être calculée par l'équation suivante (Kaynakli O, 2008).

$$E_c = \frac{86400 \times HDD \times U}{(LHV \times \eta_S)} \quad 5.6$$

Avec, LHV est le pouvoir calorifique inférieur du carburant, donné habituellement par J/kg, J/m^3 ou J/kWh selon le type de carburant, prise égale à 35.22 MJ/m^3 (Staffell I, 2011) et η_S est l'efficacité du système de chauffage, prise égale à 0.93 (Daouas N, 2011).

La consommation d'énergie annuelle pour le refroidissement est donnée par:

$$E_r = \frac{86400 \times CDD \times U}{COP} \quad 5.7$$

Le coût annuel d'énergie par unité de surface du mur pour le chauffage et le refroidissement est donné par (Bolattürk A, 2006):

$$C_r = E_r \times C_{el} \quad 5.8$$

$$C_c = E_c \times C_{gaz} \quad 5.9$$

Avec C_{el} est le coût d'électricité (€/kWh) et C_{gaz} est le coût du carburant (€/kWh).

5.2.1.4. Habitat étudie

Un type de logement individuel a été choisi, avec une surface totale égale à 80 m^2 et 3m d'hauteur. L'espace de vie est de 50 % de la surface totale comme représente la figure 5.1. (a). L'enveloppe extérieure de l'espace de vie est de 54 m^2. Le mur extérieur se compose, de l'extérieure à l'intérieure, d'une couche de ciment, brique, espace d'air, brique et couche de plâtre, comme représente la figure 5.1. (b). Cette structure est employée dans les calculs pour toutes les villes considérées (48 stations de l'Algérie). Les caractéristiques thermiques des matériaux constituants le mur extérieur sont données dans le tableau 5.2.

Tableau 5. 2 : Caractéristiques thermiques du mur extérieur (CNERIB, 2011) (Ghedamsi R et al, 2014) (Ghedamsi R et al, 2016).

Matériaux de construction	Conductivité thermique, k (W/m K)	Résistance thermique
Ciment	1.4	0.014
Plâtre	0.35	0.043
Brique	0.48	0.31
Lame d'air	0.026	0.16

La figure suivante représente le plan et la structure du mur pour le logement typique :

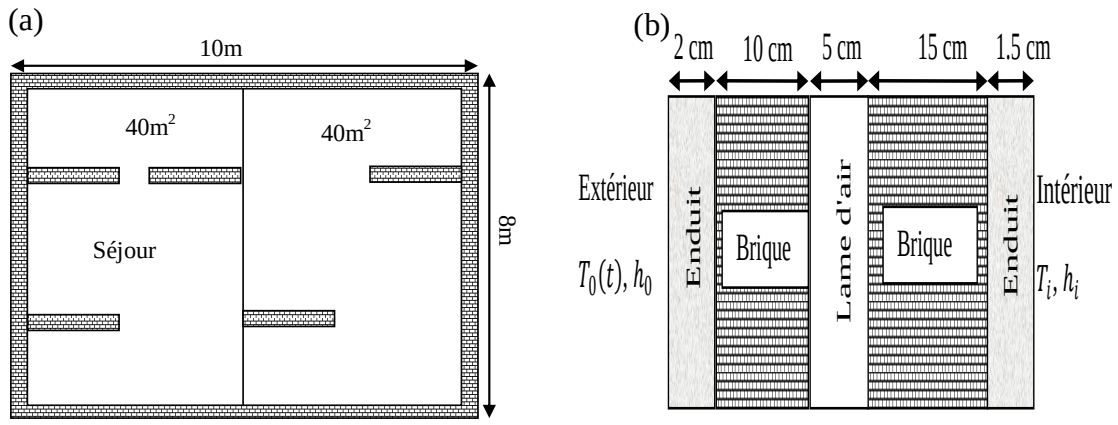


Figure 5.2: Plan du logement étudie et structure du mur extérieur (Ghedamsi R et al, 2016).

5.2.1.5. Système d'Information Géographique (SIG) pour le zonage climatique

Un système d'information géographique (Arcgis version 9.3) est utilisé dans ce travail. Le SIG (Arcgis 9.3), avec leurs outils disponibles dans Arctoolbox et sa capacité d'analyse spatiale, nous a permis de présenter la localisation spatiale des 48 stations (Tableau 5.3) ainsi que le développement des cartographies géo-numérisées de zones climatiques. Cela nécessite une distribution spatiale des données énergétiques sur tout le territoire national. Après avoir calculé les coûts annuels de chauffage et de refroidissement pour les 48 stations.

Tableau 5.3: Réseau des 48 stations synoptiques utilisées pour la réalisation des zonages climatologiques.

N°	Station	N°	Station	N°	Station	N°	Station
1	Adrar	13	Constantine	25	In Salah	37	Oum El Bouaghi
2	Ain Sefra	14	Dar El beida	26	Ksar Chellala	38	Setif
3	Annaba	15	Djanet	27	Maghnia	39	Sidi Bel Abbes
4	Batna	16	Djelfa	28	Mascara Matemore	40	Souk Ahras
5	Bechar	17	El Golea	29	Mecheria	41	Tamenrasset Airport
6	Bejaia airport	18	El Kheiter	30	Medea	42	Tebessa
7	Beni Abbes	19	El Oued	31	Miliana	43	Tiaret
8	Beni-Saf, Tle	20	Ghardaia	32	Mostaganem	44	Timimoun
9	Biskra	21	Guelma	33	M'sila	45	Tindouf
10	Bordj B. Mokhtar	22	Hassi Messaoud	34	Naama	46	Tizi Ouzou
11	Bordj Bou Arreridj	23	Illizi	35	Oran Senia	47	Tlemcen Zenata
12	Bou Saada	24	In Amenas	36	Ouargla	48	Touggourt

Les résultats obtenus seront rassemblés dans une feuille de calcul Excel contenant les données énergétiques et géographiques (longitude et latitude) comme représenté dans le tableau suivant :

Tableau 5. 4 : Données énergétiques et géographiques pour les 48 stations.

N°	Station	Longitude	Latitude	Besoin énergétique de refroidissement (kWh/m^2)	Besoin énergétique de chauffage (kWh/m^2)	Coût de refroidissement (€/m^2)	Coût de chauffage (€/m^2)
1	Adrar	27.82	-0.18	45.8	16.43	3.6	0.015
2	Ain Sefra	32.77	-0.6	15.45	41.38	1.21	0.038
3	Annaba	36.83	7.82	2.61	29.71	0.21	0.027
/	/	/	/	/	/	/	/
/	/	/	/	/	/	/	/
48	Touggourt	6.13	33.12	25.44	21.9	2	0.81

Ces données sont par la suite introduites dans l'Arcgis 9.3 pour développer une cartographie de localisation géographique des 48 stations météorologiques dans le territoire national comme représenté dans la figure 5.3.

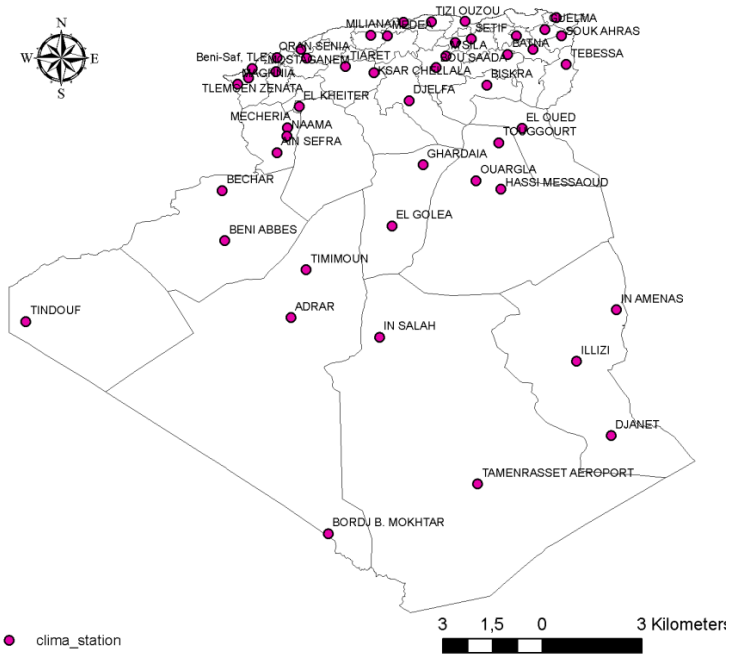


Figure 5. 3: Localisation géographique des 48 stations météorologiques.

L'intégration simple de ces données (les coûts annuels d'énergie pour le chauffage et le refroidissement par unité de surface dans chaque station) dans le SIG, ne permet pas de connaître leurs valeurs sur l'ensemble du territoire. Il est donc nécessaire de passer d'une donnée ponctuelle à une donnée dite continue, en utilisant les méthodes d'interpolations disponibles sous Arcgis 9.3.

Après l'étape de l'interpolation, le territoire Algérien a été subdivisé en sept zones climatiques homogènes pour le refroidissement Zone 1 à Zone 7, comme représenté dans la figure 5.4, et seulement en trois zones climatiques homogènes de chauffage comme représenté dans la figure 5.5 (Ghedamsi R et al., 2016).

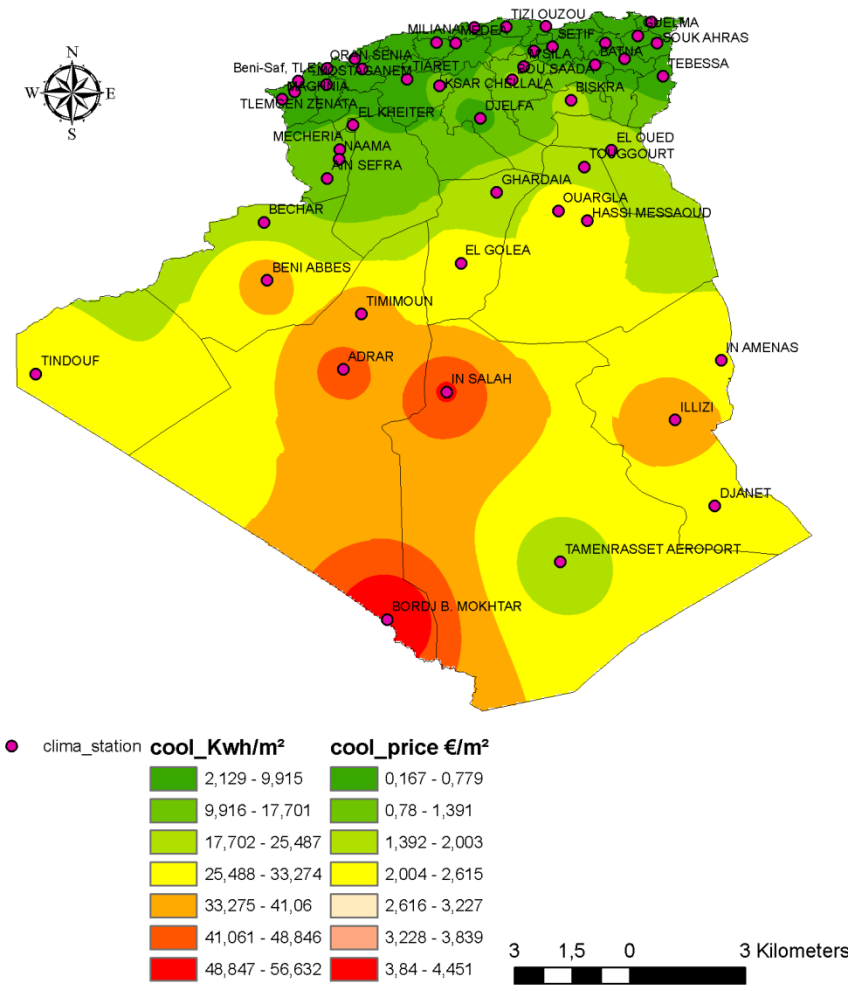


Figure 5.4: Zonage climatique de l'Algérie selon les degrés jours de climatisation à base de 26°C.

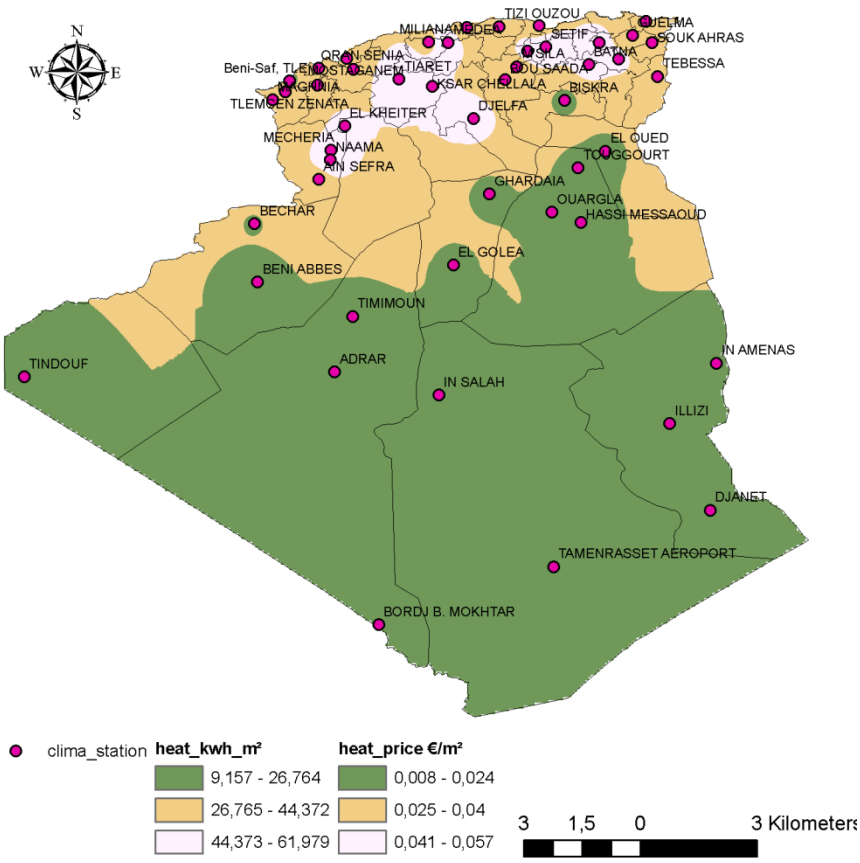


Figure 5.5 : Zonage climatique de l'Algérie selon les degrés jours de chauffage à base de 18°C.

Un zonage climatique final a été développé basé sur la somme des coûts de chauffage et de refroidissement comme représenté dans la figure 5.6. Ce zonage final est semblable au zonage de refroidissement (figure 5.4), ce qui peut être justifié par la dominance du coût d'électricité devant le coût du gaz naturel (un rapport de 4 fois supérieure dans le cas réel).

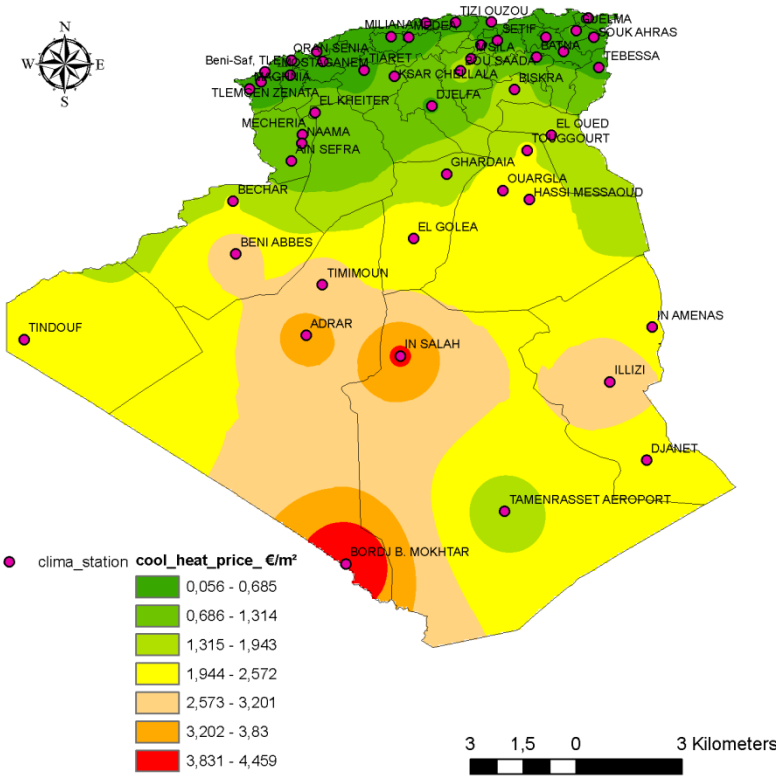


Figure 5.6 : Zonage climatique final d'Algérie adapté aux besoins de la réglementation thermique dans le bâtiment**.**

Après la répartition de l'Algérie dans les zones climatiques, la consommation d'énergie annuelle finale par ménage pour le refroidissement et le chauffage a été calculée dans chaque zone selon les équations suivantes.

$$E_{Z,c} = E_{Hou,c} \times O_c \times \mathrm{N_{Hou}} \qquad 5.10$$

$$E_{Z,h} = E_{Hou,h} \times O_h \times \mathrm{N_{Hou}} \qquad 5.11$$

Avec, $E_{Hou,c}$ et $E_{Hou,h}$ sont la consommation d'énergie finale par ménage pour le refroidissement et le chauffage dans les sept zones en (kWh/an), respectivement. O_c, O_h sont le taux d'équipement pour les appareils de climatisation et de chauffage des ménages dans chaque zone (%). $\mathrm{N_{Hou}}$ est le nombre de ménages dans chaque zone. Nous proposons, le taux d'équipement pour les appareils de chauffage est le même pour toutes les zones (100%) tandis que pour des appareils de climatisation par zone climatique qui varie de 100% pour les zones chaudes à 40% dans les zones froides très peu demandeuse en climatisation (Tableau 5.5).

Tableau 5.5 : Taux d'équipement pour les appareils de climatisation.

Zone	1	2	3	4	5	6	7
Taux d'équipement (%)	100	95	95	90	60	40	40

5.2.2. Détermination du nombre de ménages pour chaque zone

Le nombre de logements par zone climatique est un déterminant majeur pour calculer la consommation d'énergie dans les différentes zones. Selon le Recensement Général de la Population et de l'Habitat (RGPH) édité par l'Office National des Statistiques (ONS) pour l'année 2008 (RGPH, 2008), le nombre de la population est détaillé selon le découpage administratif de l'Algérie en 48 wilayas. Cela nous permet de définir le nombre de ménages selon ce type de répartition, par contre le zonage (découpage climatique) développé pour cette étude est totalement différent. La figure 5.7 montre que certaines wilayas incluent plus qu'une seule zone (eg. Wilayas de Tiaret inclus les zones 6 et 7). A cet effet, pour calculer le nombre de ménages pour les différentes zones obtenues, une nouvelle couche d'information à moindre échelle (l'échelle des communes) a été développée. Pour cela, plus de 1500 communes ont été géo-référencées (longitude et latitude), en utilisant le Google Earth Pro version 7.0.3, par des repères rouge comme présente la figure suivante :

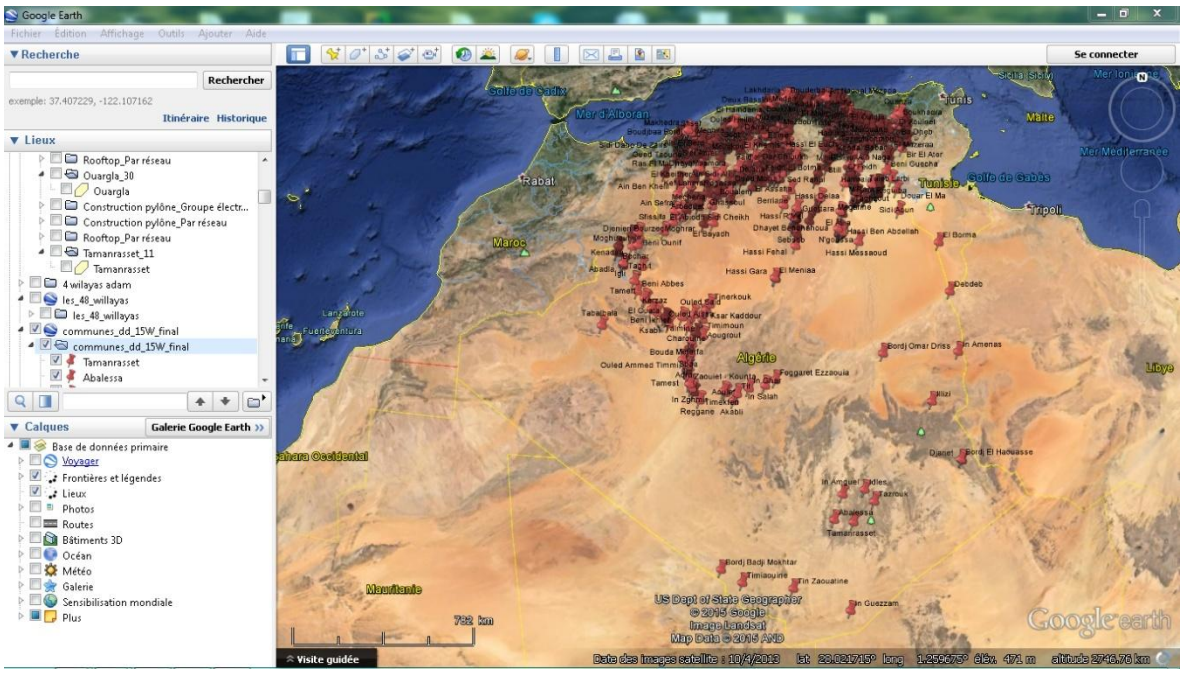


Figure 5.7: Localisation de communes algériennes sous Google Earth.

Ces données sont enregistrées dans un fichier avec extension (.kml) sous Google Earth Pro, et ensuite introduites dans l'Arcgis 9.3 pour développer une cartographie de localisation géographique des 1540 communes comme représente la figure 5.8.

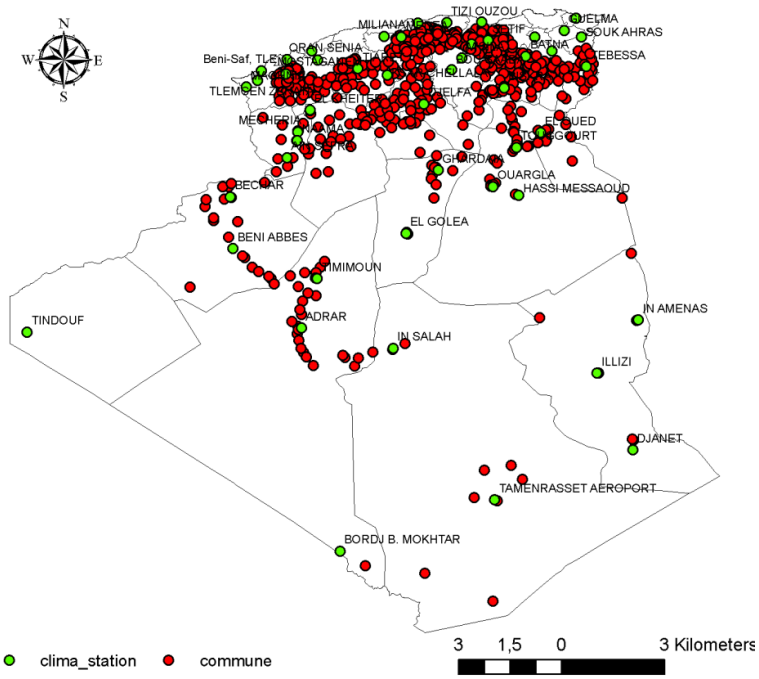


Figure 5. 8: Localisation géographique des 1540 communes sous Arcgis 9.3.

La combinaison des deux couches d'information (zonage final et localisation des communes) nous permet de déterminer le nombre de ménages pour chaque zone climatique, en utilisant les outils d'analyse spatial disponible sous Arcgis 9.3. Le tableau 3.9 représente les caractéristiques des sept zones climatiques obtenues.

Tableau 5. 6 : Caractéristiques des sept zones climatiques obtenues.

Zonage finale	Nombre des ménages	Nombre des ménages occupés	Nombre des ménages occupés raccordés en gaz naturel	Nombre des ménages électrifiés
Z1	12,373	9,871	9,871	9,770
Z2	49,519	39,506	39,506	39,104
Z3	47 106	37,580	37,580	37,198
Z4	196,694	156,920	156,920	155,323
Z5	419,398	334,590	334,590	331,185
Z6	1,126,895	899,021	899,021	889,873
Z7	5,246,683	4,185,732	4,185,732	4,143,140

Pour l'année de base 2008, le taux d'occupation des logements, le taux d'électrification et l'accès au gaz naturel sont prises égale à 97.87% (ONS, 2015), 98.9 % et 100 % respectivement. Pour le gaz naturel le taux réel est égal à 47% (ME, 2015), mais on a considéré que les logements qui n'ont pas accès au gaz de ville, sont alimentés par le gaz de butane.

Les résultats de consommation d'énergie finale par ménage pour le chauffage et le refroidissement obtenus sont présentés dans le tableau suivant :

Tableau 5. 7 : Consommation d'énergie finale par ménage pour le chauffage et le refroidissement (Ghedamsi R et al., 2016).

Zone climatique	Consommation d'énergie finale par ménage en kWh	
	Chauffage	Refroidissement
Zone 1	969.81	2841.75
Zone 2	969.81	2409.03
Zone 3	969.81	1976.31
Zone 4	1185.50	1543.59
Zone 5	1455.48	1110.87
Zone 6	2339.31	678.15
Zone 7	2215.12	245.43

La consommation d'énergie pour le refroidissement d'un client situé dans la zone 1 est significativement plus élevée que la consommation d'un client situé dans la zone 7. Cette particularité s'explique par l'utilisation massive de la climatisation, vu la spécificité climatique des régions sud caractérisées par des températures élevées durant plusieurs mois de l'année. La consommation d'énergie pour le chauffage d'un client situé dans la zone 7 est nettement supérieure à la consommation d'un client habitant la zone 1 du pays. En effet, la consommation d'un client zone 7 a atteint en l'année de base (2008) de 2215.12 kWh/an. Dans la zone 1 un client a consommé quelque 969.81 plus. Les conditions climatiques assez rudes en hiver dans la zone 7 expliquent le recours de cette population au chauffage.

5.2.3. Demande d'énergie pour l'eau chaude sanitaire (ECS) et les équipements électroménagers

La demande d'énergie pour l'eau chaude sanitaire et les équipements électroménagers (Eapp, kWh / an) a été estimée comme suit:

$$E_{app} = E_{c,app} \times O_{app} \times \mathrm{N_{Hou}} \qquad 5.12$$

Avec, $E_{c,app}$ est la consommation d'énergie finale par ménage pour chaque appareil (kWh / an); O_{app} est le taux d'équipement pour chaque appareil (%).

Le tableau 5.8 présent la consommation d'énergie finale et le taux d'équipement par ménage pour chaque appareil en Algérie.

Tableau 5. 8 : Consommation d'énergie finale par ménage pour les appareils électroménagers (Ghedamsi R et al., 2016).

Services énergétiques	Consommation spécifique par ménage (kWh)	Taux d'équipement (%)
Eau chaude	1074	100
Cuisson	7925	100
Éclairage	518	100
Réfrigération	353	100
Congélateur	478	100
Télévision	278	100
Lave linge	653	100
Micro-ondes	8.4	20
Ventilateur	14	100
Fer à repasser	103	60

5. 2.4. Consommation d'énergie finale et coût par ménage et par zone

La figure 5.9 montre la consommation d'énergie finale et le coût total par ménage et pour chaque zone climatique. Comme il apparaît dans la figure, la plus grande catégorie d'utilisation d'énergie finale est l'eau chaude et la cuisson avec 46%. La deuxième catégorie la plus importante concerne les appareils électroménagers, qui englobent téléviseurs et autres appareils. La consommation d'éclairage et la réfrigération sont de 8 % et 7 %, respectivement. La consommation d'énergie par ménage pour le chauffage et le refroidissement est également estimée.

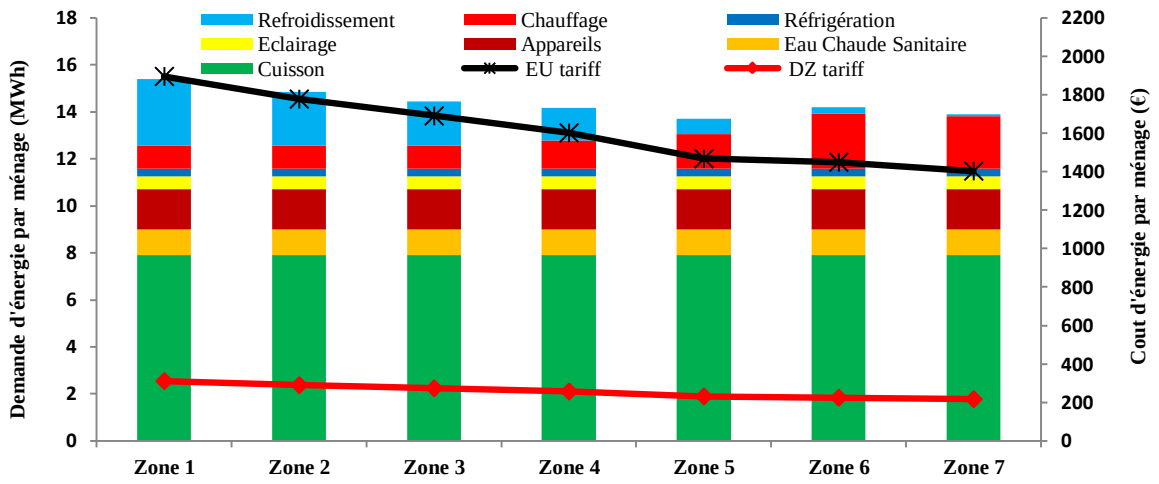


Figure 5.9 : Consommation d'énergie finale et coût par ménage et par zone.

Les conditions climatiques présentent un paramètre important qui influe sur la consommation d'énergie, notamment du chauffage et de refroidissement. Cette influence apparait pour les différentes zones obtenues dans cette étude, où l'énergie nécessaire pour le refroidissement par ménage dans la zone 1 est de 2,841 kWh alors qu'elle est de 241 kWh dans la zone 7. En revanche, l'énergie requise pour le chauffage dans la zone 1 est de 969 kWh, qui est presque le double de la consommation énergétique dans la zone 7. La consommation annuelle moyenne d'un logement en Algérie est de 14 374 kWh**.** D'autre part le coût énergétique total par ménage est le plus élevé dans la zone 1 (1,896 €) et la zone 2 (1,778 €) (climat aride au sud de l'Algérie) pour être plus acceptables pour les zones 3 et 4 avec 1,602 € et 1,690 € respectivement. Dans les zones 5, 6 et 7, le coût est moins important et atteint une moyenne de 1,440 €. Cette disparité des coûts entre les différentes zones, n'est pas clairement apparue avec l'utilisation du tarif algérien. Ceci est principalement dû à la baisse des prix unitaires de gaz et d'électricité qui sont subventionnés par l'état.

La consommation totale d'énergie est plus importante dans la zone 7 au nord du pays avec 73% de la consommation totale, par contre pour la zone 1 située au sud du pays, elle ne représente que 0.2%. Cette diversité est due essentiellement à la répartition de la population qui est concentrés dans le nord (un pole administratif et économique). La figure ci-dessous indique la répartition de la demande d'énergie finale par zone climatique.

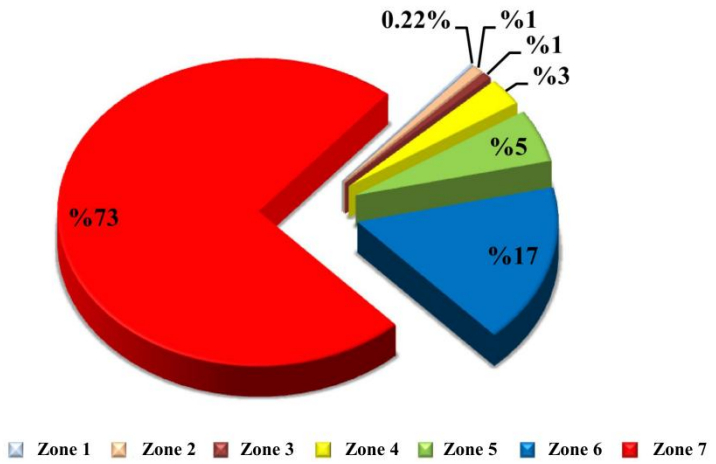


Figure 5. 10 : Répartition de la demande d'énergie finale par zone climatique (Ghedamsi R et al, 2016).

5.3. Prévision de la consommation d'énergie dans le secteur résidentiel à l'horizon 2040

La prévision joue un rôle très important dans la détermination des futurs possibles de l'évolution des trajectoires de consommations et d'émissions, trouver les stratégies répondant aux incertitudes réelles, trouver la croissance future des consommations d'énergie, détermination des gisements d'économies d'énergie dans le secteur résidentiel, et avec quelles méthodes les quantifier et les exploiter, trouver les leviers technologiques disponibles pour atteindre nos objectifs en termes d'amélioration de la performance énergétique des logements et de stabilisation des émissions de CO_2 à long terme et de gestion des charges dans le secteur résidentiel (Ouahab A, 2015).

Pour notre cas, nous adaptons le modèle autonome pour faire la projection de la demande énergétique en Algérie à l'horizon de 2040. Le taux de croissance annuel a été considéré comme augmentant la consommation d'énergie E_n (Equation 5.13) (Ghedamsi R et al., 2015b), (Ghedamsi R et al., 2016), (Gouveia J.P et al., 2012).

$$E_n = [E_{n-1}(1+te_n)] \times N_{Hou} \qquad 5.13$$

Où

E_n (kWh) représente la consommation observée de l'année n et te_n est le taux d'accroissement annuel moyen de la consommation d'énergie entre l'année n-1 et n.

Le modèle s'articule autour d'un certain nombre d'hypothèses argumentées relatives au contexte démographique et économique. Les principales hypothèses, utilisées dans cette étude, pour la prévision de la demande en énergie finale du secteur résidentiel algérien sont détaillées ci-dessous :

5.3.1. Hypothèses de prévision

5.3.1.1. Population

La démographie est un déterminant essentiel de l'évolution de la demande énergétique par le biais de son impact sur l'évolution à long terme de l'économie. Par ailleurs, la population et le nombre de ménages ont un impact direct sur la consommation énergétique du secteur résidentiel puisqu'ils influencent le nombre d'appareils ménagers ainsi que la surface totale des logements devant être chauffée et éclairée (Bogaert H, 2004). A cet effet, une analyse des données de l'évolution et la répartition géographique de la population est nécessaire. Le recensement général de la population et de l'habitat révèle (RGPH) que la population résidente dans le pays atteignant 34,1 millions d'habitants en 2008 (RGPH, 2008). La population est polarisée sur le nord du pays où se concentre 63% de la population algérienne habitants sont ainsi regroupés sur 4% du territoire national. 28% sont localisés sur les Hauts Plateaux soit 9% du territoire alors que le Sud, c'est-à-dire 87% du territoire n'accueille que 9% de la population (SNAT, 2010). La population en Algérie a enregistré une augmentation rapide de 12.7 millions d'habitants en 1965 pour atteindre de 41,2 millions en 2017 (ONS, 2017). Le tableau 5.9 montre l'évolution du taux d'accroissement annuel moyen (TCAM) de la population entre 1966 et 2013:

Tableau 5.9: Taux d'accroissement annuel moyen de la population entre 1966 et 2013.

Année	1966 – 1977	1977 – 1987	1987 – 1998	1998 – 2008	2008-2013
TCAM (%)	3.21	3.06	2.15	1.6	1.65

On remarque une baisse continue du taux de croissance depuis l'année 1966 de 3.21% pour atteindre 1.6 % en 2008. Pour la période 2008-2013, le taux de croissance se stabilise à une valeur d'environ 1.6 %. Pendant la période de projection, le taux de croissance annuelle moyenne de la population, qui a été adopté, est de 1,6 % (SNAT, 2010). D'après les projections, la population algérienne compterait 48.3 millions d'habitants à l'horizon 2030 (ce chiffre qui été confirmé par les résultats présenté dans le SNAT). La population atteindra environ 60 millions d'habitants en 2040 en utilisant le même taux de croissance.

5.3.1.2. Parc des logements

Les principales hypothèses d'évolution des ménages, pour la prévision de la demande en énergie finale du secteur résidentiel algérien sont détaillées ci-dessous :

- Cette étude inclut uniquement les logements occupés.
- Selon le programme quinquennal 2010-2014 (Programme de développement quinquennal 2010-2014, 2010), Réalisation de 2 millions de maisons par an entre 2010 et 2017, dont 1.2 million sont livrés durant le quinquennat, avec une moyenne de 200,000 logements par an, l'auto-construction est de l'ordre de 20,000 maisons par an. Le reste (0,8 million) sont mis en chantier avant la fin de l'année 2014, et seront livrés dans les trois prochaines années (2015-2017) (Programme de développement quinquennal 2010-2014, 2010).
- Réalisation de 4 millions de logements par an entre 2020 et 2040, construction de l'ordre de 200 000 logements par an (SNAT, 2010).

La figure 5.11 montre, la croissance des logements et le taux d'occupation. Le nombre de ménages a augmenté, passant de 6.9 millions en 2008 à 7.2 millions de logements en 2010. Selon le programme quinquennal 2010-2014 et le Schéma national d'aménagement du territoire 2030, le nombre des logements sera augmenté à 11,47 en 2030 et 13,67 en 2040. Le taux des logements passera de 79% en 2008 à 92,42% en 2040, avec un taux de croissance annuel de 4,91% par an. Le nombre des logements occupés passera de 5,2 millions en 2008 à 12,6 en 2040 (Ghedamsi et al., 2016).

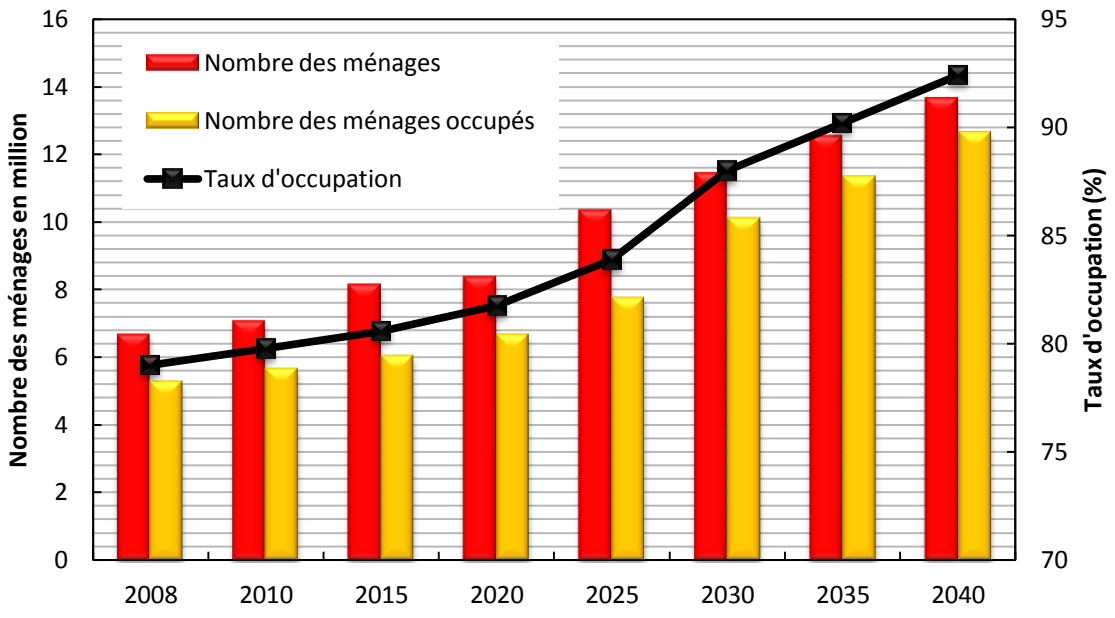


Figure 5.11: Croissance des logements.

5.3.1.3. Raccordements en électricité et en gaz naturel

Le taux d'électrification en Algérie est parmi les plus élevés dans le monde. Selon la Commission de Régulation de l'Electricité et du Gaz (CREG) (GREG, 2015), le taux d'électrification à près de 98% en 2008, pour atteindre en 2012, 99 % (Sonalgaz, 2013). Avec un taux de croissance moyen annuel (AAGR) de 0.5% par an, nous avons supposé dans ce modèle que, après 2015, tous les ménages seront électrifiés (100%). Le taux de gazéification qui a permis d'atteindre un taux de pénétration du gaz naturel de 47,4% à 2011, et nous prévoyons une augmentation de ce taux à l'avenir (Sonalgaz, 2013). Dans cette étude, nous concédons que tous les logements sont alimentés par le gaz naturel, parce que même si le gaz naturel n'est pas disponible pour certains ménages, le butane est utilisé pour le remplacer.

5.3.2. Description des scénarios

Un scénario est un moyen de se représenter en vue d'éclairer l'action présente à la lumière des futurs possibles et souhaitables (Plassard F, 2004). Afin de démontrer les futurs possibles de l'évolution des trajectoires des consommations d'énergie et évaluer les économies d'énergie dans le secteur résidentiel, deux scénarios ont été analysés dans cette étude, le scénario tendanciel et le scénario volontariste.

5.3.2.1. Scénarios tendanciel (business as usual)

Un scénario tendanciel est un scénario où la demande d'énergie évolue dans le futur conformément aux tendances du passé et où aucune politique énergétique nouvelle ou environnementale n'est adoptée. Ce scénario représente l'évolution de la demande d'énergie du secteur résidentiel algérien pendant 32 ans de projection. Dans le secteur résidentiel algérien, l'électricité est utilisée comme énergie pour le refroidissement, l'éclairage et les d'appareils électroménagers. Tandis que Le gaz naturel est utilisé pour la cuisson, le chauffage et l'ECS (Ghedamsi R, 2015). Le tableau 5.10 montre la technologie et l'énergie utilisée pour chaque service énergétique. Dans le scénario tendanciel, on considère que les dispositifs utilisés pour le refroidissement sont des systèmes à compression mécanique avec un COP de 2.5 et pour l'éclairage, on utilise des lampes à incandescences. L'évolution de la demande d'énergie finale selon le scénario tendanciel est donnée dans la figure 5.12.

Tableau 5. 10: Equipement des ménages algérien et carburant utilisé selon les deux scénarios.

Services énergétiques	Scénario tendanciel (BAU)	Scénario volontariste	Energie utilisée
Refroidissement	Climatiseur à compression mécanique COP=2,5	Climatiseur à absorption COP=1, COP = 1,5	électricité /gaz
Chauffage	Chauffage	Chauffage	gaz
Éclairage	Lampes à incandescence	LBC (Lampe à Basse Consommation)	électricité
Cuisson et ECS	Cuisinière et chauffe eau	Cuisinière et chauffe eau	gaz
Appareils électroménagers	(réfrigérateur, congélateur, TV, ventilateur, micro-ondes, fer à repasser)	(réfrigérateur, congélateur, TV, ventilateur, micro-ondes, fer à repasser)	électricité

5.3.2.2. Scénarios volontariste

Un scénario volontariste a été choisi pour atteindre nos cibles en termes d'amélioration de la performance énergétique des logements et de stabilisation des émissions de CO_2 à l'horizon de 2040. Ce scénario fondé sur deux hypothèses spécifiques aux systèmes d'éclairage et de refroidissement comme détaillé ci-dessous :

-Éclairage : Dans le scénario volontariste, les actions sur l'éclairage des bâtiments des logements neufs concernent l'effectif du parc de logements neufs construit après 2008. Les logements neufs

construits sont considérés utilisant des Lampes à Basse Consommation d'énergie (LBC) qui sont plus efficaces que les lampes à incandescences. Les économies d'énergie électrique réalisées en 2040 dans l'éclairage par rapport au scénario tendanciel sont présentées dans la figure 5.15.

-Refroidissement: Dans ce scénario nous substituera aux dispositifs de compression par le système à absorption. A la différence d'un procédé de production de froid par compression, le procédé par absorption s'avère plus économique d'un point de vue consommation électrique tout en assurant une production efficace de froid. Dans ce travail, le système de refroidissement à absorption peut être introduit à hauteur de 20% de la charge de refroidissement en 2015. Cinq ans après (en 2020), la pénétration du système à absorption s'élèvera à 70% pour être à 100% en 2025. Les raisons qui encouragent l'utilisation du système à absorption sont la disponibilité d'une grande réserve en gaz naturel et le développement d'un réseau de distribution très efficace et répandu pendant les années récentes, où un très grand nombre de ménages ayant accès au gaz naturel. Les coûts d'électricité (4.178 DA/kWh) sont quatre fois supérieurs que les coûts du gaz naturel (1.11 DA/kWh), ainsi le coût d'une unité de réfrigération obtenue par absorption est beaucoup plus inférieure à celle produite par compression mécanique. L'utilisation des équipements de réfrigération par absorption en utilisant le gaz pour se refroidir peut réduire les coûts de refroidissement d'un bâtiment, en éliminant la majeure partie de la demande électrique (kWh) liée au refroidissement. En plus, les systèmes de refroidissement par le gaz naturel ont une plus grande efficacité que d'autres systèmes électriques semblables. Seulement 5-10% de la ressource en énergie carburant est perdu avec un système de gaz, alors que cette perte est de l'ordre de 65 à 75% dans le cas de l'utilisation de l'électricité (production et distribution) de la ressource énergétique initiale (Shekarchian M et al, 2011).

Le système à absorption comporte un ensemble de condensation-évaporation comparé aux systèmes à compression mécanique. Le générateur reçoit la puissance thermique nécessaire à la désorption de la solution Eau-LiBr (figure 5.12). Cette désorption transforme la solution riche en solution pauvre et chaude qui est renvoyée via une vanne, pouvant être commandée, vers l'absorbeur à travers un échangeur récupérateur. La solution pauvre s'enrichit dans l'absorbeur grâce à la vapeur d'eau arrivant de l'évaporateur. Elle y cède une puissance thermique qui permet la sorption de cette vapeur. Elle est ensuite refoulée par une pompe vers le générateur. Le système comporte un échangeur récupérateur entre la solution chaude provenant du générateur et la solution froide qui arrive de l'absorbeur. La vapeur d'eau séparée de la solution dans le générateur constitue le fluide frigorigène et s'écoule vers le condenseur où elle est refroidie et condensée avant d'être détendue par une vanne, pouvant elle aussi être commandée, et

réintroduite dans l'évaporateur où l'on obtient l'effet utile. De cette façon, le fluide frigorigène parcours un cycle (Touaibi R et al., 2013).

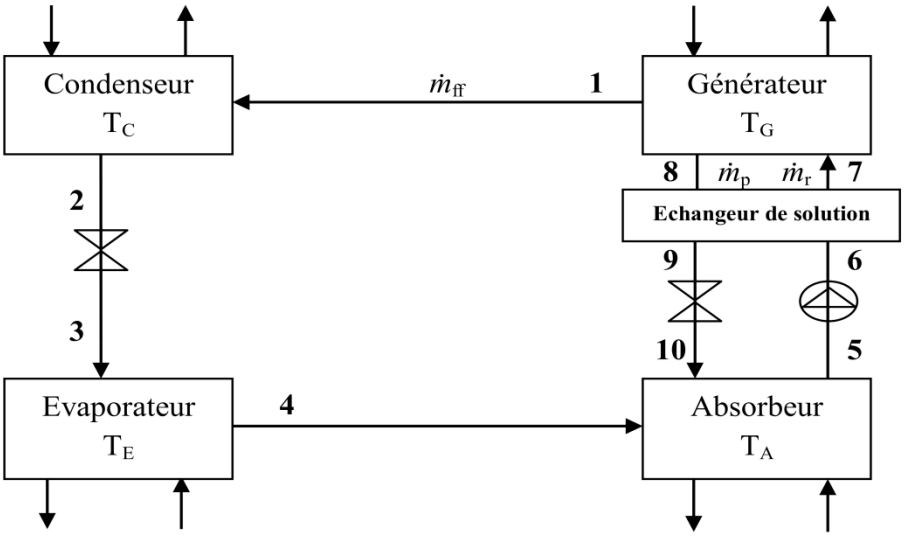


Figure 5. 12: Schéma de base d'un système de réfrigération par absorption.

- **Coefficient de performance**

Le coefficient de performance d'un système de réfrigération par absorption est défini par le rapport entre l'effet utile obtenu et la dépense énergétique. Il s'exprime comme suit:

$$\mathrm{COP} = \frac{\mathrm{Q_E}}{\mathrm{Q_G} + W_{POM}} \qquad 5.14$$

Où :

- $\mathrm{Q_E}$ est la puissance thermique absorbée par le fluide frigorigène au niveau de l'évaporateur et qui s'exprime comme suit:

$$\mathrm{Q_E} = (\mathrm{h_4} - \mathrm{h_3}) \qquad 5.15$$

- Q_G Est la chaleur fournie au générateur par la source thermique extérieure nécessaire pour extraire le fluide frigorigène de la solution et qui s'écrit comme suit :

$$Q_G = \dot{m}_{ff}\, h_1 + \dot{m}_p h_8 + \dot{m}_r h_7 \qquad 5.16$$

- W_{POM} est la puissance consommée par la pompe de circulation qui transporte la solution riche en frigorigène vers le générateur à haute pression et qui s'écrit comme suit :

$$W_{POM} = \dot{m}_r (\, h_6 - \, h_5) \qquad 5.17$$

Il existe plusieurs configurations des cycles à absorption classiques (frigorifiques ou thermiques) dont les plus importantes sont comme suit:

- Cycle frigorifique à absorption à simple effet : La figure 5.12 montre le cycle frigorifique à absorption avec ses différentes parties comme le condenseur et le l'absorbeur qui rejettent de la chaleur inutile dans l'environnement, le désorbeur (générateur) qui prélève une quantité de chaleur d'une source à plus haute température et l'évaporateur qui pompe de la chaleur dans l'enceinte à refroidir, produisant ainsi une froideur utile.

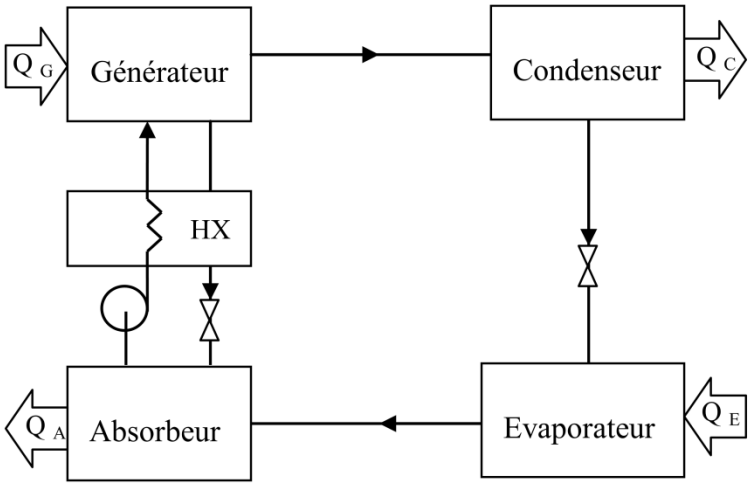


Figure 5. 13: Cycle frigorifique à absorption à simple effet.

- Cycles frigorifiques à plusieurs effets : L'objectif du cycle frigorifique à plusieurs effets est d'augmenter la performance du système à absorption, ou accroître leur domaine d'utilisation possible, en faisant usage de systèmes à étages, ou effets multiples. Les variantes possibles sont nombreuses surtouts si l'intérêt porte sur la production simultanée de froid et de la chaleur. Le cycle frigorifique à absorption à double effet a été introduit durant la période allant de 1956 à 1958. La figure 5.13 montre un tel cycle utilisant le système LiBr/eau, où la vapeur du réfrigérant générée par le générateur à premier effet est condensée à haute pression dans le générateur à second effet. Cependant la chaleur rejetée est utilisée pour produire une vapeur supplémentaire du réfrigérant à partir de la solution provenant du générateur à premier effet. (La chaleur issue de la condensation de la vapeur du réfrigérant est utilisée dans le générateur II) Si toute la vapeur du réfrigérant provenant du premier générateur se condense dans le second générateur, le COP du système devrait être deux fois celui du système à simple effet correspondant (Zermane O E, 2012).

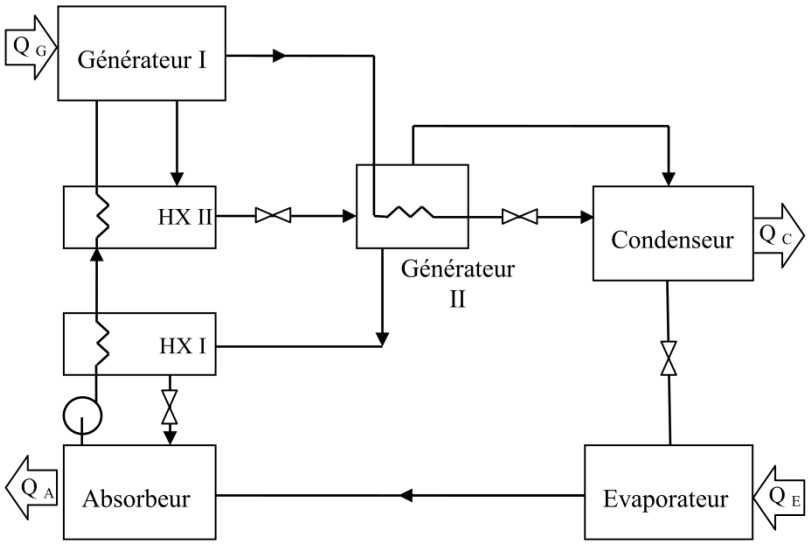


Figure 5.14: Cycle frigorifique à absorption à double effet opérant à trois niveaux de pression: haute, modérée et basse.

5.4. Analyse de résultats

5.4.1. Demande d'énergie finale dans le scénario tendanciel

La consommation d'énergie augmente rapidement en raison de la croissance de la population, de l'urbanisation, de la migration vers les grandes villes et de l'amélioration du niveau de vie. La figure 5.14 illustre la projection de la demande énergétique dans le scénario tendanciel sur la période 2008-2040. Les résultats de ce scénario de référence montrent une croissance de la consommation totale d'énergie sur la période de projection, par une moyenne de 2.9 % par an, de 73,23 TWh en 2008 jusqu'à 180TWh en 2040. Cette augmentation est due principalement à la hausse du nombre de ménages climatisés (ou conditionnées) et de l'expansion rapide de l'intégration des appareils électriques dans le secteur résidentiel. La cuisson, le chauffage et l'eau chaude, sont les principaux consommateurs d'énergie dans le secteur résidentiel algérien.

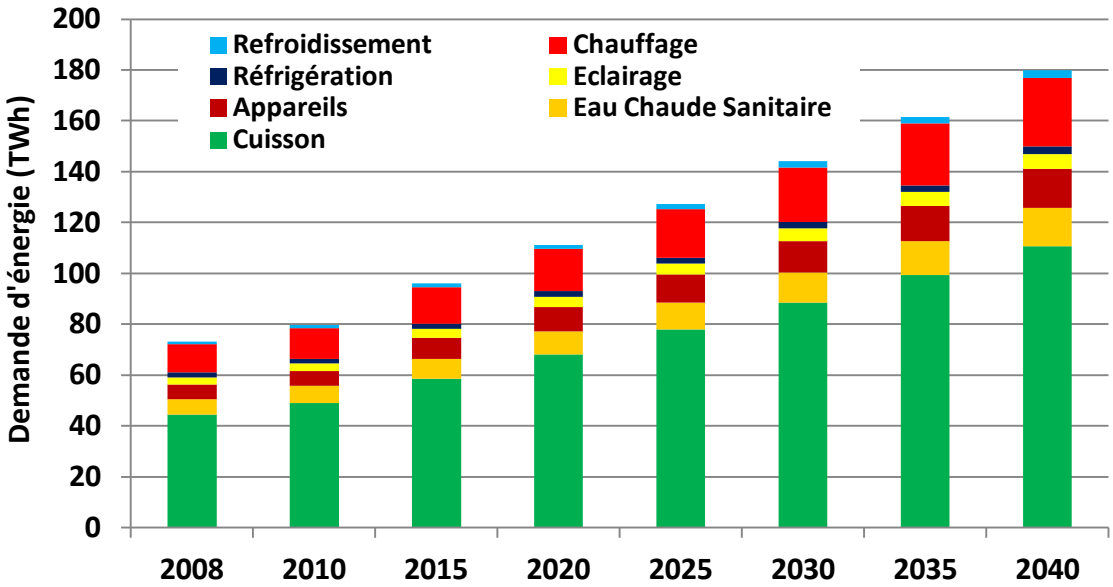


Figure 5. 15: Evolution de la demande énergétique dans le scénario tendanciel (Ghedamsi R et al., 2016).

5.4.2. Demande d'énergie pour l'éclairage dans les différents scénarios

Dans le scénario tendanciel, la consommation d'électricité destinée à l'éclairage dans le secteur résidentiel algérien atteint 2.71 TWh en 2008. Sous l'avancement de construction des nouveaux logements et la croissance démographique, cette consommation d'électricité atteindra 5.98 TWh en 2040. Pour le scénario volontariste, la contribution des lampes à basse consommation dans les nouvelles constructions mènera à l'économie d'énergie de plus de 20% pour l'année 2020 et plus de 35% pour l'année 2040, comme il est présenté dans la figure 5.16.

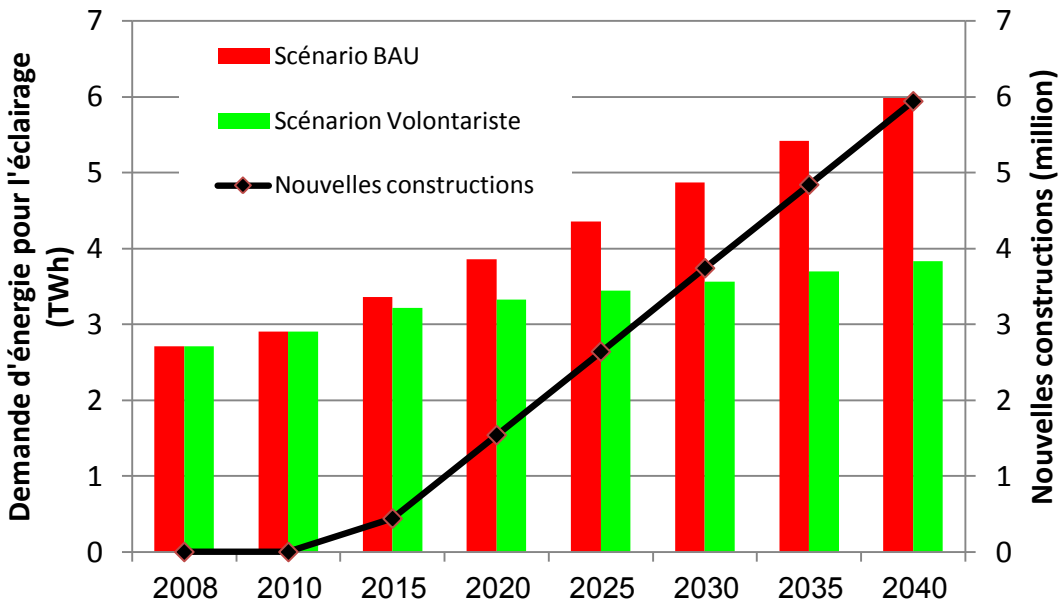


Figure 5.16: Evolution de la demande d'énergie pour l'éclairage dans les différents scénarios.

5.4.3. Demande énergétique et coûts totaux du système de conditionnement d'air dans les différents scénarios

L'Algérie possède des réserves en gaz importantes qui ont été estimées à environ 4.5 trillion de mètres cubes en 2013 (BP, 2014). Le prix du gaz naturel en Algérie est beaucoup plus inférieur à celui de l'électricité.

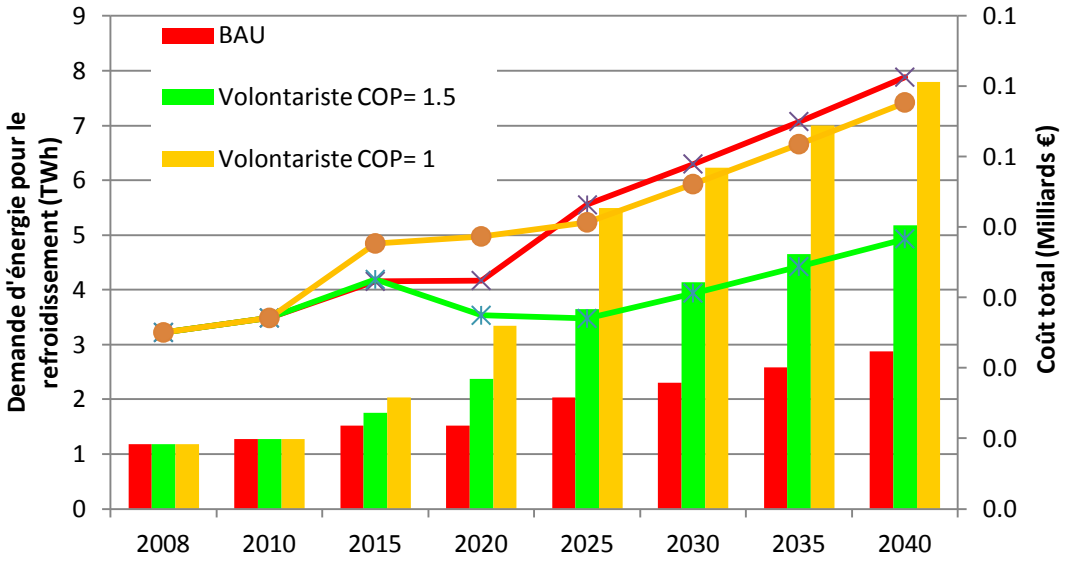


Figure 5.17: Demande d'énergie pour le refroidissement selon les deux scénarios.

La figure 5.17 montre la consommation et le coût total d'énergie pour le conditionnement d'air à travers les deux systèmes (à absorption et à compression mécanique) à l'horizon 2040. Les résultats prouvent que la demande d'énergie pour le conditionnement d'air utilisant des systèmes à absorption est beaucoup plus importante que pour les systèmes à compression mécanique, mais puisque le prix du gaz naturel est beaucoup plus inférieur à celui de l'électricité, le coût total de l'énergie consommée pour les systèmes à compression est nettement supérieur à celui des systèmes à absorption. Cette différence entre les deux coûts augmente au fil des années pour atteindre une économie d'énergie égale à la moitié de la consommation énergétique en 2040 où le taux d'intégration du système à absorption atteint 100%. Cette différence est évaluée à 230 millions d'euros pour un COP égal à 1.5.

5.4.3.1. Économie d'énergie pour le refroidissement dans le scénario volontariste

L'économie en énergie dans le scénario volontariste ne peut apparaitre au niveau de la consommation final. Par ailleurs, il est important de noter que l'évaluation des économies d'énergie générées par un système à absorption doit être ramenée en énergie primaire lorsqu'on la compare à des systèmes à compression mécaniques. Pour cette raison, un schéma explicatif de la chaîne d'énergie pour chacun des deux systèmes a été présenté dans la figure 5.17. L'énergie primaire est définie par la somme de l'énergie finale consommé au point de distribution plus les pertes de production, due à l'efficacité du système de conversion, plus les pertes de transport et de distribution. Pour un système à compression mécanique alimenté par l'électricité, la consommation d'énergie primaire inclut des pertes de production (45-55%) au niveau de la centrale de production (Shekarchian M et al, 2011), transport et de distribution de l'électricité (20%) (World Bank, 2014). Pour un système à absorption alimenté directement par le gaz naturel avec aucun processus de conversion, la consommation d'énergie primaire inclut les pertes de carburant éprouvées dans le transport et la distribution (5-10%) (Shekarchian M et al, 2011).

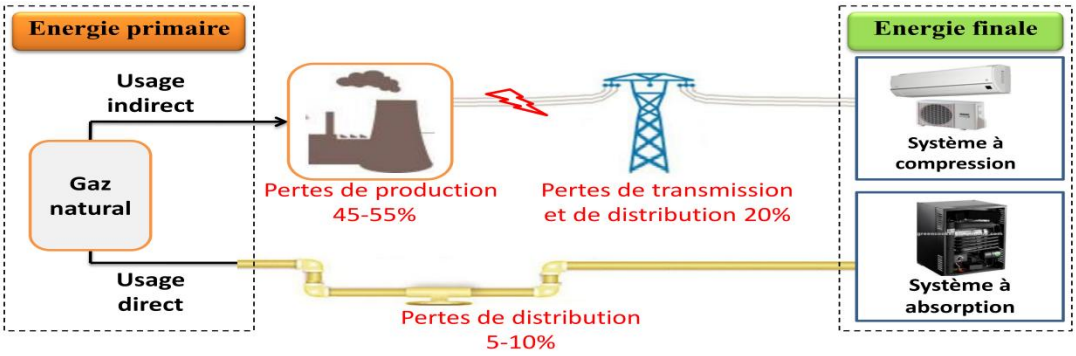


Figure 5.18: Schéma explicatif de la chaîne d'énergie pour les deux systèmes à absorption et à compression.

La consommation d'énergie primaire E_p pour chaque système est donnée par l'équation suivante:

$$E_P = E_{r,tot} /(1 - \sum_i Per_i /100) \qquad 5.18$$

Où : $E_{r,tot}$ représente la consommation d'énergie finale, Per_i représente les pertes de production, de transmission et de distribution en %.

La figure 5.18 présente la demande d'énergie primaire (gaz naturel) pour le refroidissement selon les deux scénarios.

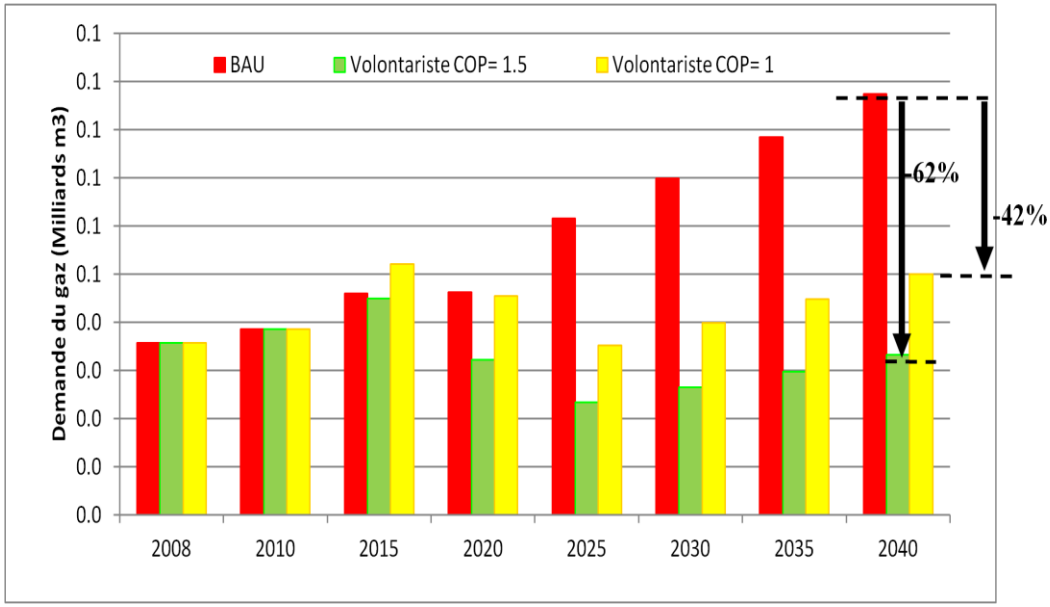


Figure 5. 18: Economie en énergie primaire (gaz naturel) pour le refroidissement.

Dans le scénario tendanciel où BAU la demande d'énergie primaire évolue de 0.386 milliard m^3 en 2010 pour atteindre 0.874 milliard de mètres cubes en 2040. Cette évolution est moins importante selon le scénario volontariste où l'on distingue deux périodes:

- 1er période allant de 2010 à 2020 : pour les cinq premières années, avec un faible taux d'intégration du système à absorption qui est inferieur à 20%, une légère réduction de la consommation d'énergie sera réalisée pour le COP 1.5 avec aucune économie pour le COP 1. Le taux d'intégration du système à absorption continuent a évolue pour atteindre 70% en 2020, où des économies d'énergie pourraient être réalisées 1.6% et 32% pour COP de 1 et COP de 1.5 respectivement.

- 2ème période allant de 2020 à 2040 : A l'horizon 2040, où le taux d'intégration du système à absorption atteindra 100 %, les économies d'énergie pourraient atteindre 62% et 42% pour un système à absorption avec un COP de 1.5 et COP 1 par apport au scénario tendanciel.

5.5. Conclusion

Ce chapitre présente une approche bottom-up pour la modélisation et la prévision de la demande énergétique du secteur résidentiel en Algérie à l'horizon 2040. Le point de départ pour développer les projections de la consommation d'énergie est établi par la demande d'énergie de différents usages finaux pour l'année de base (2008). Dans cette étude, deux scénarios ont été construits, un scénario tendanciel et un autre volontariste. Le résultat dans de le scénario tendanciel montre une augmentation de la consommation d'énergie pouvant atteindre 2.9% par an de 73.23 TWh en 2008 jusqu'à 179.78 TWh en 2040. Cette évolution est essentiellement due à la croissance rapide du nombre de bâtiments climatisés et de l'expansion rapide de l'utilisation des appareils électriques.

La réalisation d'un scénario volontariste avec l'intégration des systèmes plus performant (LBC pour l'éclairage et système à absorption pour le refroidissement) permet de minimiser la facture énergétique et économique au niveau du citoyen et ainsi de contribuer à la préservation des ressources énergétiques, notamment le gaz naturel. En outre, la prévision de la demande énergétique et l'analyse des scénarios permettront de considérer différentes conditions possibles dans le secteur résidentiel à l'avenir. Cette approche constitue un volet fondamental pour un processus de planification et des politiques de maîtrise de la demande.

Chapitre 6

Développement d'une méthodologie de conception de bâtiments à énergie positive et applications

6.1. Introduction

L'utilisation massive des combustibles fossiles produit de grandes quantités de gaz à effet de serre, l'augmentation de leur concentration dans l'atmosphère terrestre est l'un des facteurs à l'origine du réchauffement climatique. La lutte contre les changements climatiques présente actuellement un des défis principaux. Le bâtiment est le secteur d'activité le plus consommateur d'énergie, qui pourrait être sensiblement réduite par une conception durable, une grande efficacité énergétique et l'utilisation des sources renouvelables. En outre, la politique nationale encourage les consommateurs à chercher des solutions respectueuses de l'environnement. Le concept de bâtiments à énergie positive, qui devrait être la perspective future de la conception du bâtiment, est devenu un enjeu mondial au cours de la dernière décennie. Les bâtiments à énergie positive sont définis comme des bâtiments dont les besoins énergétiques annuels sont fournis uniquement par des sources d'énergie renouvelables. Le coût des technologies d'énergie renouvelable peut être attrayant dans le cas de l'énergie éolienne et de l'énergie solaire, leur nature intermittente rend plus difficile leur intégration dans le réseau. Par conséquent, un dimensionnement optimal d'un système d'approvisionnement en énergie renouvelable peut avoir un impact significatif sur sa performance économique et, par conséquent, sur sa fiabilité. Au stade de la conception d'un système d'approvisionnement en énergie du bâtiment, il faut tenir compte de nombreux aspects, y compris la performance économique, l'impact sur l'environnement et les problèmes de fiabilité. En d'autres termes, les décideurs, qui sont en charge de la conception du système énergétique, doivent faire un compromis entre différentes options offrant un large éventail de coûts, taux d'énergie renouvelable, besoin de stockage d'énergie, d'impact environnemental et de fiabilité. Cela signifie que ce problème d'ingénierie nécessite une optimisation simultanée de ces objectifs conflictuels (Sharafi M et al., 2015). Ce chapitre propose un modèle dynamique capable d'intégrer les différentes sources d'énergie renouvelables pour convertir un bâtiment individuel consommateur d'énergie à un bâtiment à énergie positive, dans les conditions climatiques de la ville de Ouargla. Le modèle est utilisé pour optimiser un système hybride relié au réseau qui peut exploiter différentes sources d'énergie renouvelables (panneaux photovoltaïques et générateurs éoliens).

6.2. Méthodologie

Cette étude démontre la possibilité de convertir un bâtiment d'habitation individuelle consommateur d'énergie à un habitat à énergie positive. Les bâtiments à énergie positive sont caractérisés par la haute efficacité énergétique des appareils électroménagers, des systèmes d'éclairage (lampes basses consommation d'énergie), des fenêtres hautes performance et l'isolation thermique ainsi que l'intégration des énergies renouvelables pour compléter les besoins énergétiques du bâtiment (figure 6.1).

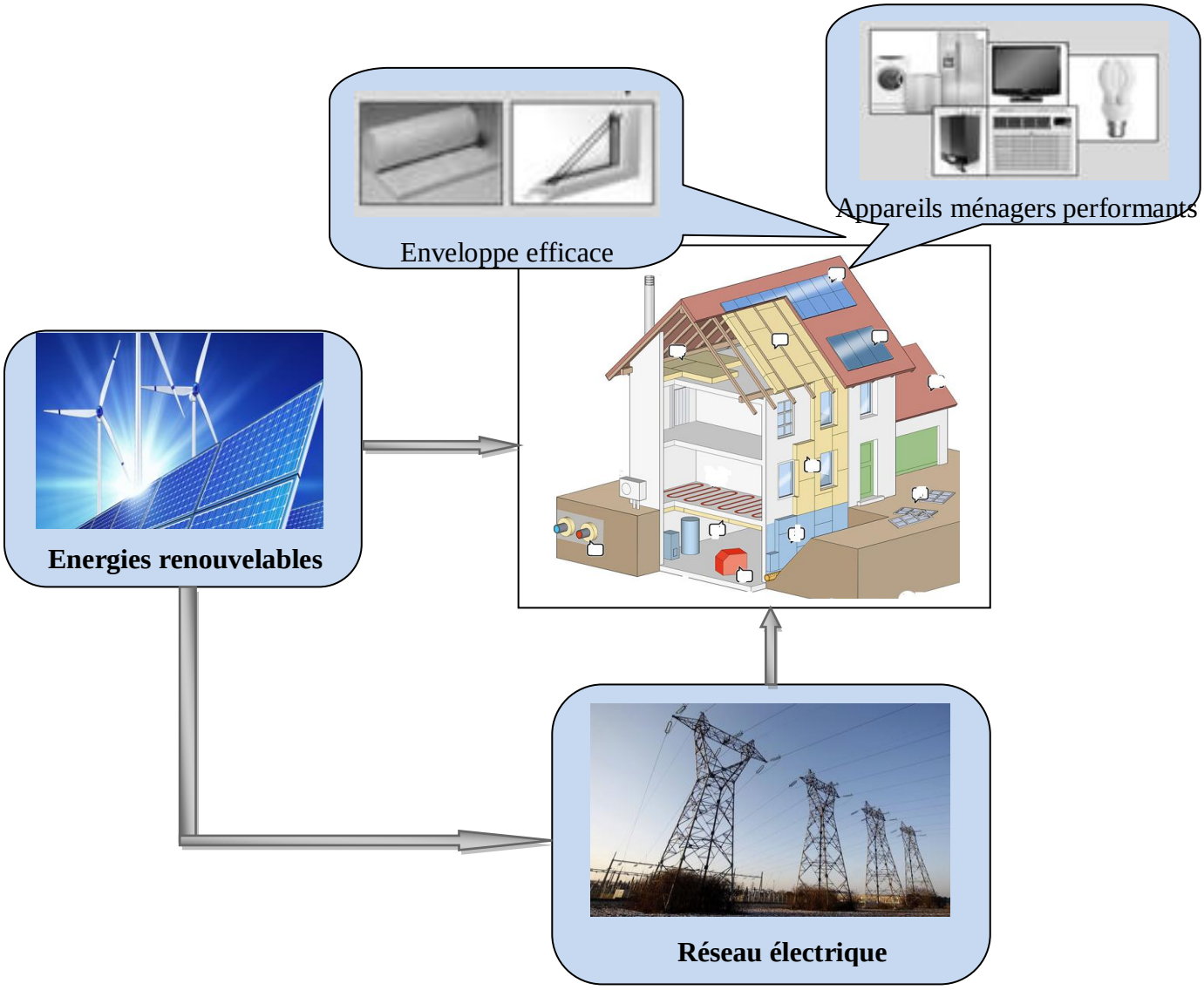


Figure 6.1: Bâtiment à énergie positive (California Energy Commission, 2009).

L'objectif de ce travail est de démontrer la possibilité de convertir un bâtiment individuel consommateur d'énergie à un bâtiment à énergie positive, cet habitat situé dans la ville de Ouargla (latitude: 31N, longitude: 5.24'E) caractérisée par un climat chaud et aride. Pour cela, une simulation numérique a été réalisée avec l'outil Matlab. Le choix s'est porté sur un bâtiment individuel occupé par une famille de 6 personnes. Cet habitat est caractérisé par la haute efficacité énergétique des appareils électroménagers, les systèmes d'éclairage (lampes basses consommation d'énergie), et l'isolation thermique (on intègre les matériaux à changement de phase micro-encapsulés dans l'enveloppe du bâtiment) ainsi que l'intégration des énergies renouvelables pour compléter les besoins énergétiques du bâtiment. Deux scénarios sont proposés pour convertir le bâtiment vers un bâtiment à énergie positive. Pour le premier scénario, on utilise un système hybride comprenant une éolienne de 0.4 kW et du module PV poly cristallins de puissance unitaire de 70 W, et pour le deuxième scénario on utilise un système hybride comprenant une éolienne de 0.4 kW et du module PV poly cristallins de puissance unitaire de 240 W. Les aspects environnementaux et économiques ont été pris en considération pour l'évaluation de notre étude. L'équilibre entre l'apport énergétique de chaque source et la demande (type de charge) n'est pas toujours réalisable. Ce manque sera compensé par l'introduction du réseau électrique. Si l'énergie produite par le système hybride dépasse l'énergie demandée par la charge, le surplus d'énergie sera envoyé au réseau électrique (figure 6.2).

La première étape après le choix d'habitat est l'estimation des besoins énergétiques par l'approche bottom–up. La deuxième étape est l'intégration des énergies renouvelables nécessaires pour compenser cette demande. La dernière étape est l'évaluation économique du projet.

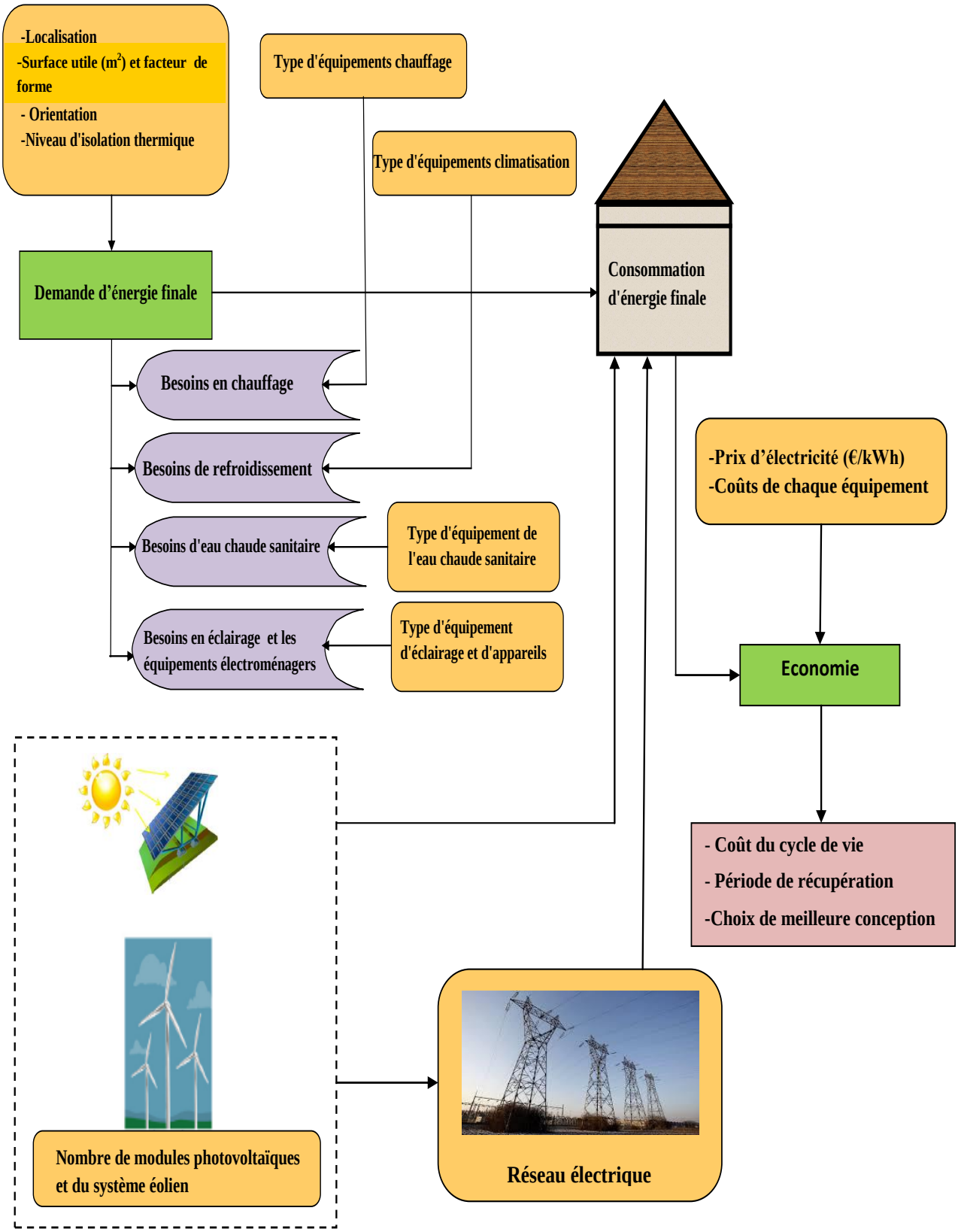


Figure 6.2: Schéma de l'outil d'application.

6.2.1. Description de l'étude de cas

L'habitation choisie pour faire l'objet de notre étude est une maison individuelle de 120 m^2 prend la forme « T » dans le cas où le facteur de forme est égale 0.725 m^{-1}. L'archétype est composé d'un séjour orienté au Nord-Est, une cuisine est située au Nord, deux chambre l'une orientée au Nord-Ouest et l'autre au Sud-Ouest, un garage est situé au Sud-Est et deux salles de bain l'une est orientée Ouest et l'autre au Sud-Est (figure 6.3) (Saifi N, 2015).

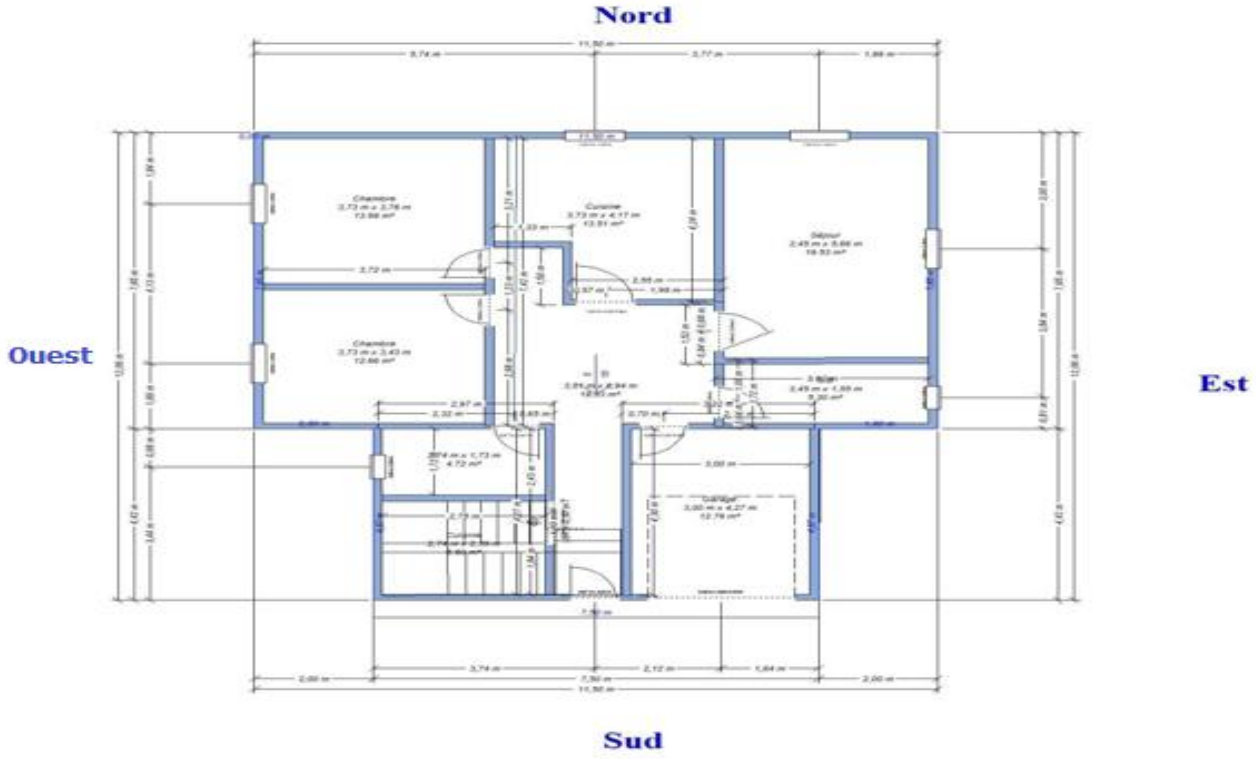


Figure 6.3: Plan de l'habitation.

Dans cette maison, on intègre les matériaux à changement de phase micro-encapsulés dans l'enveloppe du bâtiment pour réduire les consommations énergétiques et améliorer le confort. Le matériau à changement de phase choisi est le $CaCl_2.6H_2O$ (la concentration de 15%), vu qu'il présente le meilleur choix technico-économique comparé aux trois types du MCP étudiés (Ghedamsi et al., 2014). La surface extérieure du mur est exposée au rayonnement solaire périodique et à la température de l'air extérieur. La surface intérieure

ayant une température constante égale à celle de l'air de la pièce. Le mur extérieur se compose, de l'extérieur à l'intérieur, d'une couche de ciment, isolant (mélange plâtre/MCPs), brique, espace d'air, brique et couche de plâtre, comme représente la figure 6.4, avec des épaisseurs de chaque matériau utilisé respectivement 2 cm, 2cm, 10 cm; 5cm, 15 cm et 2 cm. Pour l'éclairage, nous avons intégré des Lampes à Basse Consommation d'énergie (LBC).

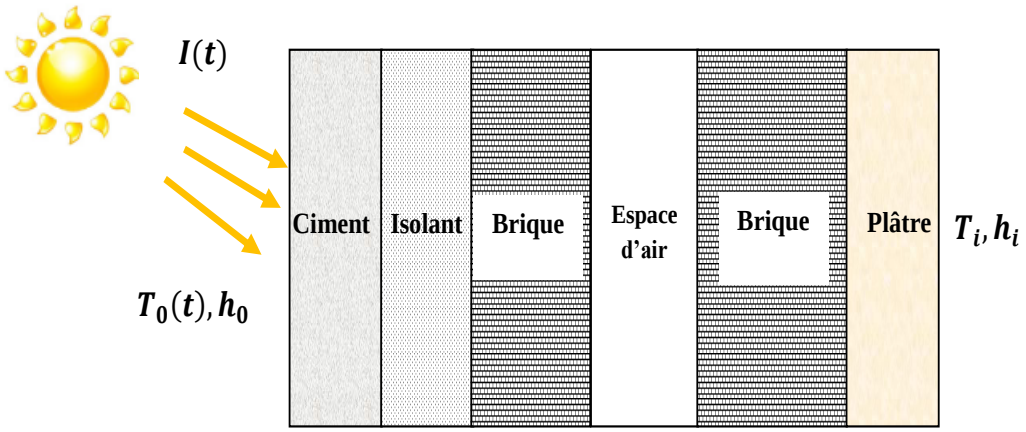


Figure 6.4: Structure du mur multicouche**.**

6.2.2. Profil de consommation d'énergie

6.2.2.1. Consommation d'énergie pour le chauffage et le refroidissement

Le calcul de la consommation d'énergie pour le chauffage et le refroidissement s'effectue comme suit:

$$E_c = \frac{HDH \times U}{\eta_S} \times A \qquad 6.1$$

$$E_r = \frac{CDH \times U}{COP} \times A \qquad 6.2$$

Avec, HDH et CDH sont les Degré-heure de chauffage et de climatisation (°C heure) et A est la surface utile (m^2).

6.2.2.2. Besoins énergétiques pour l'eau chaude sanitaire

L'eau chaude sanitaire (ECS) représente environ 8% de la consommation totale d'énergie primaire par logement (Djelloul A et al., 2013). Il est utilisé dans une maison pour une variété d'usages différents comme, de lavage, de blanchissage, etc. Les besoins en eau chaude sanitaire sont fonction du nombre d'occupants, de leurs âges respectifs, de leurs professions, de leur mode de vie, du jour de la semaine (ouvrable, week-end ou férié), de la saison, et de bien d'autres circonstances encore. La consommation d'énergie quotidienne d'eau chaude sanitaire (E_{ECS}) en (kWh/jour) peut être calculée comme suit (Yao R et al., 2005):

$$E_{ECS}=\frac{C_p \rho V(T_{out}-T_{in})}{3600} \tag{6.3}$$

Avec, C_p est la chaleur spécifique de l'eau (4.187 kJ/kg K), ρ est la masse volumique de l'eau (1000 kg/m^3), V est le volume quotidien d'eau chaude consommé pour chaque personne (m^3 /jour), T_{out} est la température de sortie de l'eau (45°C) et T_{in} est la température de l'eau froide (20 °C).

6.2.2.3. Eclairage et équipements électroménagers

La consommation des appareils électroménagers et l'éclairage, sont calculés en fonction de leur puissance et de leur durée de fonctionnement par heure:

$$E_{App} = n_n * \left(P * t_{fon}\right)/60 \qquad 6.4$$

Avec, P est la puissance de chaque appareil, n_n est le nombre des équipements et t_{fon} est la durée d'utilisation en minutes/heure.

La durée d'utilisation pendant la journée pour chaque habitation a été recensée par le biais d'un questionnaire distribué pour un ensemble d'habitants (voir annexe 6.a). Quelques valeurs de puissance d'appareils sont mentionnées dans le tableau ci-dessous (Djelloul A et al., 2013).

Tableau 6.1: Puissance électrique de chaque appareil.

Appareils	Puissance (W)
Téléviseur	150
Ordinateur	100
Four	3000
Cuisinière	3000
Fer à repasser	800
Lave linge	2200
Réfrigérateur	100
Robot	1000
Lampe basse consommation	30

6.3. Modélisation du système énergétique hybride

6.3.1. Energie produite par un module photovoltaïque (PV)

La puissance produite par un générateur photovoltaïque est estimée à partir des données de l'irradiation globale sur un plan incliné, de la température ambiante et des données du constructeur. Pour le module photovoltaïque utilisé, elle est exprimée par la relation suivante (Kaabeche A et al., 2011):

$$P_{pv}^{t} = \eta_{pv} S_{pv} G^{t} \qquad t=0,\ldots,T-1 \qquad 6.5$$

Avec, η_{pv} est le rendement d'un générateur photovoltaïque, S_{pv} est la surface totale du module photovoltaïque (m^2) et G^t est l'irradiation solaire globale du lieu considéré (Wh/m^2). Le rendement d'un générateur photovoltaïque (η_{pv}) est calculé par l'équation suivante:

$$\eta_{pv} = \eta_r \eta_{pc} [1 - \beta(T_c - T_{cref})] \qquad 6.6$$

Avec, η_r est le rendement de référence du générateur photovoltaïque, η_{pc} est le rendement de référence du module PV, et représente le rendement caractérisant l'influence de la charge, ce dernier est égal à 1 dans le cas où le système PV fonctionne en mode de Poursuite du Point de Puissance Maximale (MPPT). β est le coefficient de température qui est exprimée en (1/°C), il

est supposé constant, sachant que pour les cellules PV à base de silicone, est dans la plage 0.004 à 0.006 (1/°C). T_{cref} est la température de référence de la cellule (°C) et T_c est la température de la cellule (°C) calculée par:

$$T_c = T_a + \left[\frac{(T_{noct}-20)}{800}\right] G^t \qquad 6.7$$

Avec, T_a est la température ambiante (°C) et T_{noct} représente la température nominale d'utilisation des cellules (°C) dans les conditions NOCT (en anglais: Normal Operating Cell Temperature). η_{pc}, β, T_{noct} et S_{pv}, sont des paramètres qui dépendent du type de module utilisé (Kaabeche A et al., 2014) .

L'énergie horaire produite par le PV est donnée par (Dagdougui H et al., 2012):

$$E_{pv}^t = P_{pv}^t . \Delta t \qquad t=0,\ldots..,T-1 \qquad 6.8$$

Le tableau suivant représente les caractéristiques techniques des panneaux utilisés.

Tableau 6.2. Caractéristiques techniques des panneaux utilisés (CDER, 2014).

Type	Puissance crête (W)	Surface unitaire (m^2)	Rendement (%)
CEM70P-18	70	0.51	13.6
CEM240P-60	240	1.62	16.4

6.3.2. Energie produite par un aérogénérateur éolien

La puissance électrique produite par un aérogénérateur éolien dépend principalement de la vitesse du vent. Dans la littérature, plusieurs modèles sont présentés pour simuler la puissance d'une éolienne. Le modèle suivant est utilisé pour simuler la puissance de sortie d'une éolienne donnée comme suit (Dagdougui H et al., 2012) :

$$P_{wt}^t = \begin{cases} 0 & v^t < v_c \\ p_r \frac{(v^t)^2 - v_c^2}{v_r^2 - v_c^2} & v_c \le v^t \le v_r \\ p_r & v_r \le v^t \le v_f \\ 0 & v^t > v_f \end{cases} \qquad t=0, T-1 \qquad 6.9$$

Avec, v^t est la vitesse du vent prévue dans l'intervalle de temps, p_r est la puissance électrique nominale du générateur éolien, v_c représente la vitesse de démarrage pour laquelle l'éolienne commence à produire de l'énergie, v_r est la vitesse nominale de l'éolienne et v_f représente la vitesse maximale admissible pour laquelle la production est arrêtée. En général, les mesures de la vitesse du vent sont données à une hauteur différente de la hauteur du moyeu de l'éolienne (Kaabeche A et al., 2014). L'équation suivante est utilisée pour évaluer la vitesse du vent à la hauteur désirée (Dagdougui H et al., 2012):

$$v^t = v^t{}_{data} \frac{\ln(H_{hub}/Z)}{\ln(H_{data}/Z)} \qquad t=0,\ldots,T-1 \qquad 6.10$$

Où:

H_{data} est la hauteur des mesures (généralement 10 m), H_{hub} est la hauteur du moyeu de l'éolienne (la hauteur à laquelle le vent est estimé), Z est la longueur de rugosité de surface, et $v^t{}_{data}$ est la vitesse du vent prévue à la hauteur des mesures. Ainsi, l'énergie horaire produite par une éolienne E^t_{wt} (Wh) est (Dagdougui H et al., 2012):

$$E^t_{wt} = P^t_{wt}.\Delta t \qquad t=0,\ldots,T-1 \qquad 6.11$$

Les caractéristiques techniques de générateur d'éolienne est donnée dans le tableau suivant (Kaabeche A et al, 2011):

Tableau 6.3: Caractéristiques techniques de générateur d'éolienne.

Type	AIR 403
Puissance (W)	400
Vitesse de démarrage du vent (m/s)	3
Vitesse nominale du vent (m/s)	12
Vitesse maximale admissible (m/s)	25
Hauteur des mesures (m)	10

Le tarif d'achat des énergies renouvelables est 15.94 DA/kWh (Journal officiel, 2014).

Les températures ambiantes sont obtenues en faisant la moyenne des mesures mensuelles enregistrées selon les données météorologiques de Ouargla au cours des années 2003-2013 (ONM, 2014). Les vitesses du vent sont obtenues en faisant la moyenne des mesures horaires enregistrées selon les données Météo Ciel (Météo Ciel, 2016). La figure 6.5 montre la moyenne mensuelle de l'irradiation globale et de la vitesse du vent au cours des années (2000-2013) de la région d'étude.

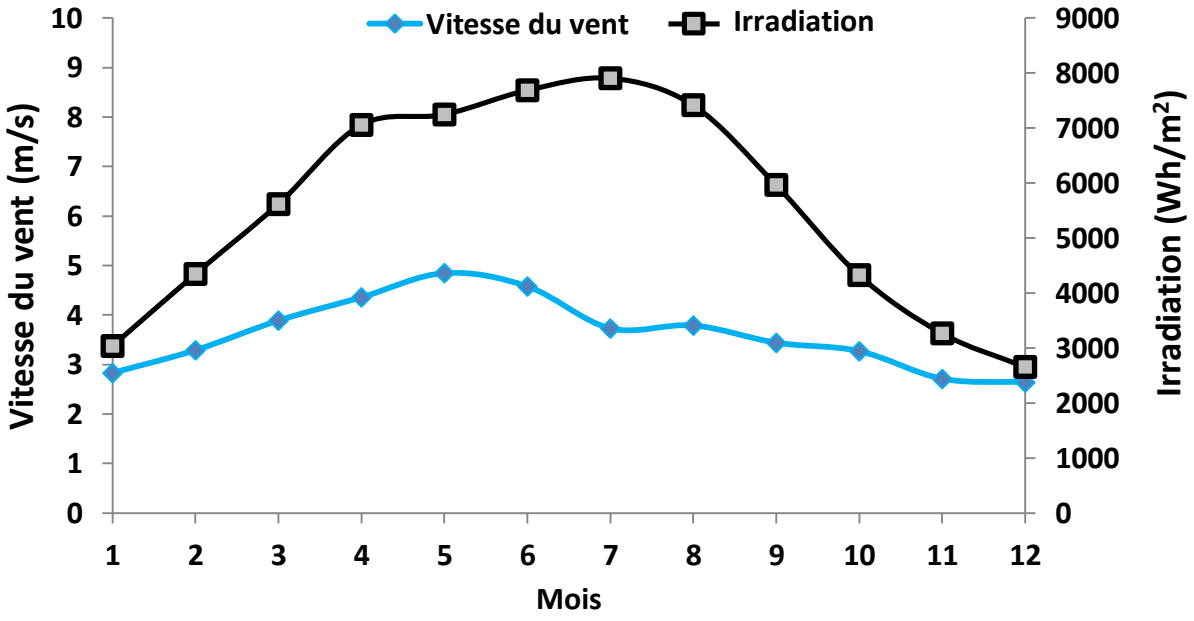


Figure 6.5: Moyenne mensuelle de l'irradiation globale et de la vitesse du vent au cours des années (2000-2013) (ONM, 2014).

Les radiations solaires sont très importantes à Ouargla, car l'atmosphère présente une grande pureté durant toute l'année. Le rayonnement solaire maximal est de 7910 Wh/m^2 au mois de Juillet, et un minimum de 2660 Wh/m^2 au mois de Décembre.

Nous observons les vitesses du vent sont importantes au cours de la saison printemps, le mois de Mai est caractérisé par des valeurs maximales que la moyenne annuelle de 4.85 m/s.

La figure 6.6 présente l'irradiation solaire globale et la vitesse du vent au cours d'un jour type du mois de Mai.

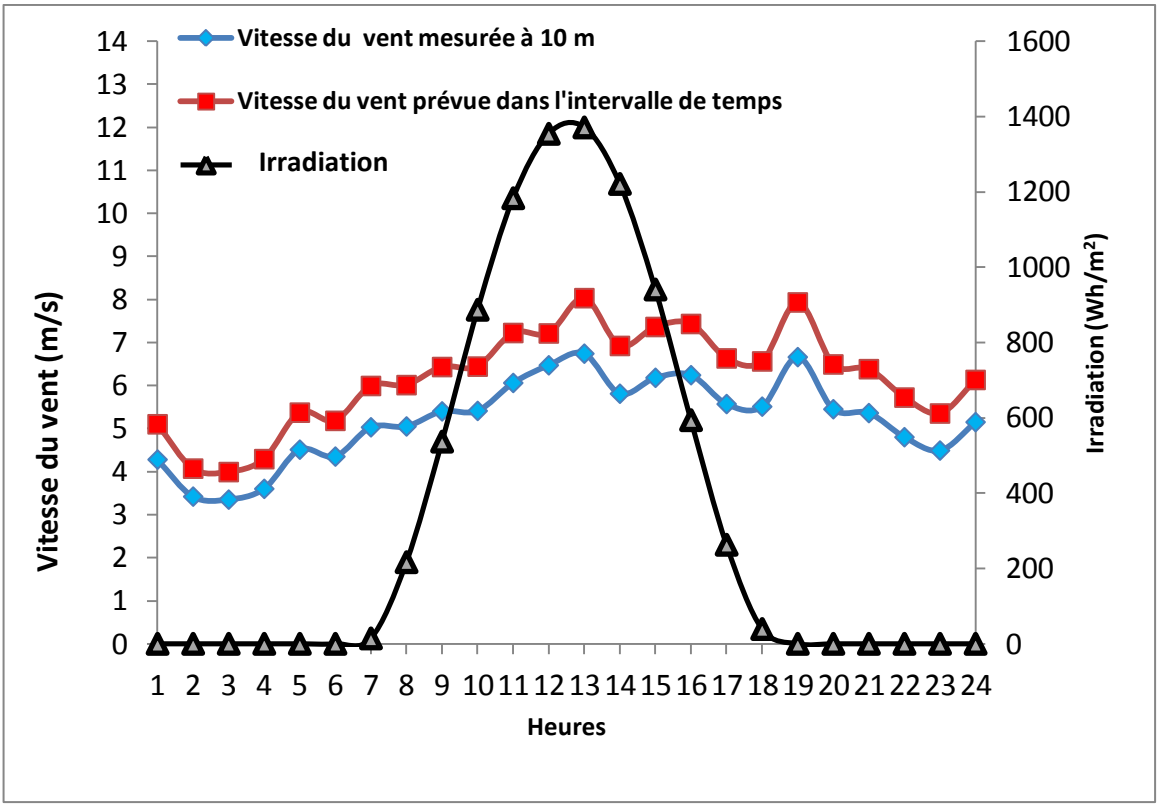


Figure 6.6: Irradiation solaire globale et la vitesse du vent au cours d'un jour du mois de Mai sur le site de Ouargla.

6.4. Besoins énergétiques

La demande d'énergie domestique horaire (E_l^t) dans l'intervalle de temps (t, t + 1), est exprimée par:

$$E_l^t = E_{pv,l}^t + E_{wt,l}^t + E_{net,l}^t \qquad t=0,\ldots,T-1 \qquad 6.12$$

Avec : $E_{pv,l}^t$, $E_{wt,l}^t$ et $E_{net,l}^t$ les énergies fournies respectivement par les modules photovoltaïques, aérogénérateur éolien et le réseau électrique pour les besoins énergétiques, dans l'intervalle de temps (t, t + 1);

L'énergie injectée dans le réseau électrique $E_{net,s}^t$ est constituée par l'excédent produit par l'éolienne et l'excédent produit par les modules PV, et s'exprime par :

$$E_{net,s}^t = E_{pv,net}^t + E_{wt,net}^t \qquad t=0,\ldots,T-1 \qquad 6.13$$

L'énergie qui est pris du réseau est donnée par:

$$E^{t}_{net,tak} = E^{t}_{net,l} \qquad t=0,\ldots..,T-1 \qquad 6.14$$

6.5. Dimensionnement du système d'énergie hybride

La méthode de dimensionnement présentée dans ce travail, consiste à déterminer la configuration optimale de la centrale hybride éolienne et photovoltaïque, permettant de convertir un bâtiment individuel consommateur d'énergie à un bâtiment à énergie positive selon deux critères d'optimisation à savoir la fiabilité et le coût:

La fiabilité est fondée sur le concept de la probabilité de perte d'énergie (Loss of Power Supply Probability (LPSP). Durant le fonctionnement du système hybride, nous pouvons distinguer les différentes étapes suivantes:

- La puissance demandée par la charge est inférieure à la puissance produite. Dans ce cas, les surplus d'énergie sont conduits vers les le réseau électrique.
- La puissance demandée par la charge est supérieure à la puissance produite, Ce manque sera compensé par l'introduction du réseau électrique.
- Le calcul du coût est établi par rapport au concept du coût de cycle de vie (CCV), il permet de choisir la configuration optimale du système, parmi l'ensemble des configurations satisfaisant le critère de fiabilité, qui présente le coût minimal.

Dans cette situation la *LPSP* est définie comme étant la fraction de l'énergie déficitaire sur celle demandée par la charge. Elle exprime le taux de non-satisfaction de la charge. Ainsi, cette probabilité est définie comme étant la somme de toutes les demandes non satisfaites 'LPS' sur l'énergie totale demandée par la charge pendant une période de fonctionnement (Pour cette étude, Période = 1 année = 8760 heures), selon l'expression suivante:

$$LPSP = \frac{\sum_{i=1}^{8760} (LPS)}{\sum_{t=1}^{8760} E_l^t} \qquad 6.15$$

Cela permet de déterminer l'ensemble des configurations qui permet d'atteindre la valeur de la LPSP désirée. Dans cette étude, nous avons choisi la probabilité de non satisfaction de la charge LPSP = 0.

La simulation a été réalisée avec l'outil Matlab afin de procéder à la résolution numérique du modèle direct. L'organigramme global est schématisé dans la figure 6.7.

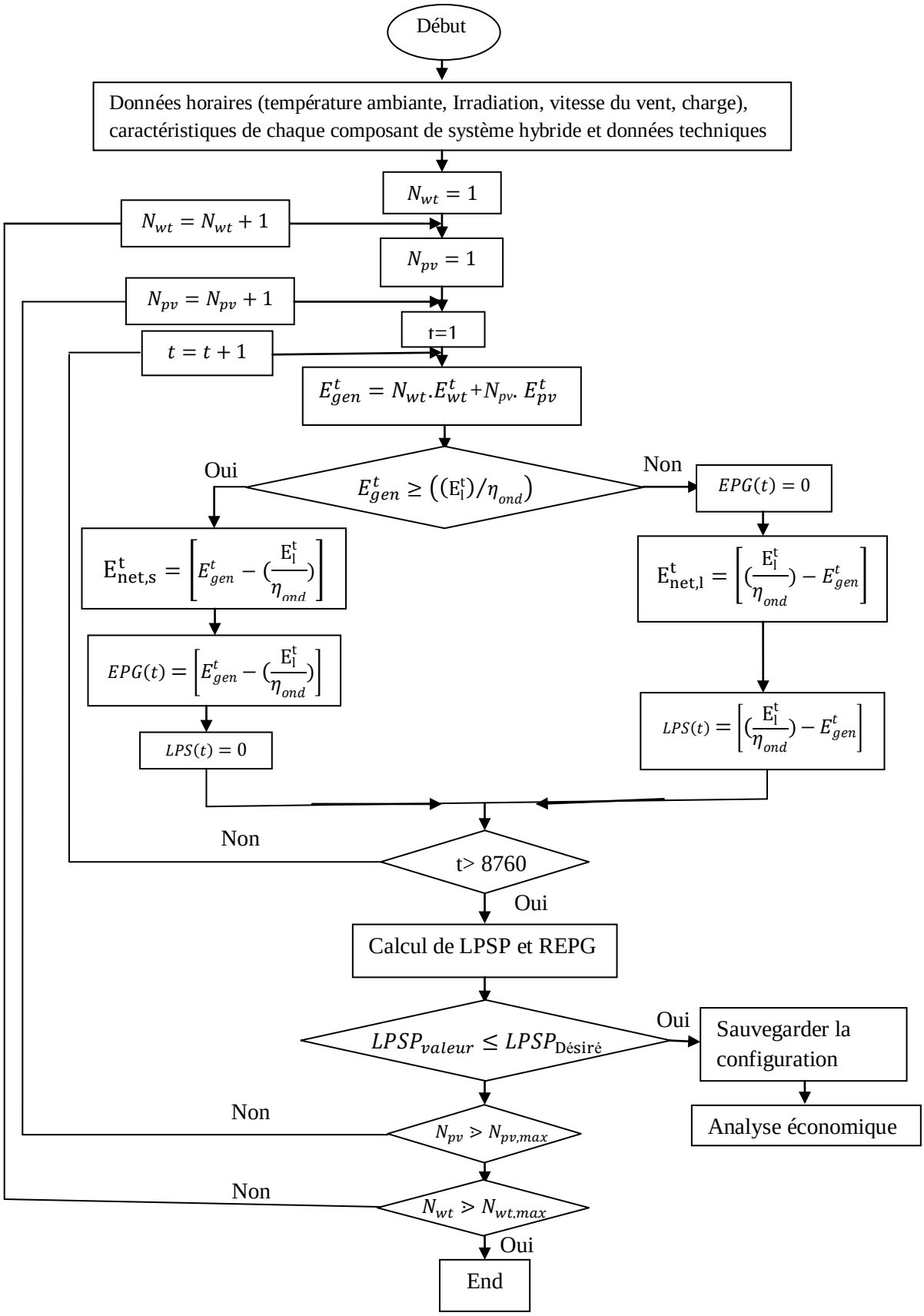


Figure 6.7: Organigramme global de l'algorithme de dimensionnement.

6.6. Impact environnemental

Il existe plusieurs gaz à effet de serre contribuent à la pollution environnementale; cependant, le CO_2 est le facteur principal du réchauffement climatique. Pour cette raison, seulement l'émission de CO_2 est considérée dans ce travail. L'émission de CO_2 à évitée pour les énergies renouvelables est déterminée supposant que chaque kWh produit par les énergies renouvelables substitue chaque kWh produit par les systèmes énergétiques conventionnels. L'émission de CO_2 évitée (E_{CO_2} en kg) des systèmes conventionnels est évaluée selon l'équation suivante:

$$E_{CO_2} = E_{Con} \times F_E \qquad 6.16$$

Où E_{Con} est l'énergie produite par les systèmes conventionnels (kWh) et F_E est le facteur d'émission de CO_2 (kg/kWh) qui dépend du type de combustible fossile et de la technique de conversion employée pour produire la puissance. Dans ce travail, l'émission de CO_2 évitée prévue est basée sur le facteur d'émission d'électricité de 0.548 (kg/kWh) (Ademe, 2015).

6.7. Indicateurs économiques

Les indicateurs couramment utilisés pour l'évaluation économique d'un projet, qui semble sensée a la fin de ce travail, sont les méthodes du coût du cycle de vie (CCV) et le temps de retour d'investissement (PR) (Kapsalaki et al., 2012). L'équation utilisée pour calculer le CCV est donnée comme suit (Krartia et al., 2016) :

$$\mathrm{CCV} = \mathrm{IC} + \mathrm{USPW}(\mathrm{N}, \mathrm{r_d}) \times \mathrm{EC} \qquad 6.17$$

Avec, IC est le coût global pour toute la durée du fonctionnement, EC représente le coût énergétique annuel nécessaire pour maintenir le confort à l'intérieur du bâtiment résidentiel pour les caractéristiques de conception et d'exploitation sélectionnées. USPW est le facteur de valeur actuelle du coût de consommation d'énergie est défini comme suit:

$$\mathrm{USPW(N,r)} = \begin{cases} \frac{(1+r)^N-1}{r_d(1+r)^N} \ , & \begin{cases} i > g & r = \frac{i-g}{1+g} \\ i < g & r = \frac{g-i}{1-i} \end{cases} \\ \frac{1}{1+i'} \ , & i = g \end{cases} \qquad 6.18$$

Avec, N est la durée de vie d'un système (25 ans).

Le temps de retour d'investissement (PR) est le coût global initial de système hybride pour les couples optimaux divisé par les économies d'énergie annuelles (A_s) , il est simplement donné par :

$$PR = \frac{IC}{A_s} \qquad 6.19$$

Les économies d'énergie annuelles sont définies comme la différence entre le coût énergétique sans système hybride et le coût énergétique avec un système hybride, qu'utilise un couple optimale des panneaux photovoltaïques et éoliens, divisée par le USPW.

Le coût global initial de système hybride pour toute la durée du fonctionnement est donné par (Bouharchouche A et al, 2014):

$$\mathrm{IC} = C_i + C_m + C_r \qquad 6.20$$

Avec:

- C_i: coût initial
- C_m: coût de maintenance
- C_r: coût de renouvellement des composants

6.7.1. Coût initial

Le coût initial lié au coût de l'achat du système, ainsi que le coût d'installation, ce dernier est exprimée par la relation suivante:

$$C_i = N_{pv}C_{pv} + N_{wt}C_{wt} + N_{ond}C_{ond} \qquad 6.21$$

Avec:

- N_{pv}: nombre de modules photovoltaïques
- N_{wt}: nombre de modules du système éolien
- N_{ond}: nombre de modules de l'onduleur
- C_{pv}: coût initial du système photovoltaïque, €
- C_{wt}: coût initial du système éolien, €
- C_{ond}: coût initial de l'onduleur, €

6.7.2. Coût de maintenance

Dans notre cas, il est donné en pourcentage par rapport au coût initial de chaque composant, et cela pour une période d'une année (Bouharchouche A et al, 2014).

$$C_m = \left(N_{pv}C_{pv}m_{pv} + N_{wt}C_{wt}m_{wt} + N_{ond}C_{ond}m_{ond}\right)N \qquad 6.22$$

Avec:

- m_{pv}: Pourcentage de maintenance annuel du système photovoltaïque, %
- m_{wt}: Pourcentage de maintenance annuel du système éolien, %
- m_{ond}: Pourcentage de maintenance annuel de l'onduleur, %

6.7.3. Coût de renouvellement des composants

Chaque composant de système a une durée de vie. Il doit être remplacé périodiquement sur toute la durée du fonctionnement de système hybride (Bouharchouche et al, 2014).

$$C_r = N_{pv}C_{pv}\left(\frac{N-N_{pv}}{N_{pv}}\right) + N_{wt}C_{wt}\left(\frac{N-N_{wt}}{N_{wt}}\right) + N_{ond}C_{ond}\left(\frac{N-N_{ond}}{N_{ond}}\right) \qquad 6.23$$

Avec, N_{pv} , N_{wt} et N_{ond} représentent respectivement les durées de vie du système photovoltaïque, du système éolien et de l'onduleur. Les caractéristiques et les prix unitaire, le coût de maintenance et la durée de vie des différents composants de l'installation (module photovoltaïque, générateur éolien et le convertisseur d'énergie) sont présentés dans le tableau 6.4.

Tableau 6.4: Coûts et la durée de vie des différents composants du système (CDER, 2014), (Kaabeche et al., 2011).

Matériel	Prix unitaire (€)	Coût de maintenance dans la première année (%)	Durée de vie (ans)	Taux d'intérêt (%)	Taux d'inflation (%)
Panneau condor CEM70P-18	51.35	1% du prix	25	8	4
Panneau Condor CEM240P-60	184.22	1% du prix	25		
Générateur éolienne (AIR 403)	645	3% du prix	20		
Convertisseur d'énergie 24V-2400 W	835.82	0% du prix	10		

6.8. Résultats et discussions

6.8.1. Profil de consommation d'énergie

Après avoir défini les équipements électriques ainsi que leurs conditions d'utilisation, nous réalisons des profils de consommation d'énergie journalière (heure par heure) du logement étudié. Les calculs sont effectués pendant un jour type pour chaque mois de l'année. Le jour type est considéré comme jour représentatif. La variation horaire de la consommation d'énergie est intégrée pendant 24 heures pour obtenir une charge quotidienne. Le procédé est répété pour chaque jour type des mois d'année (de Janvier à Décembre). La demande énergétique annuelle d'une maison est calculée à partir des charges quotidiennes qui sont ajoutées sur toute l'année.

La figure 6.8 présente les différents profils d'énergie journalière consommée durant un mois froid et chaud de l'année (Janvier et juillet) pour la ville de Ouargla.

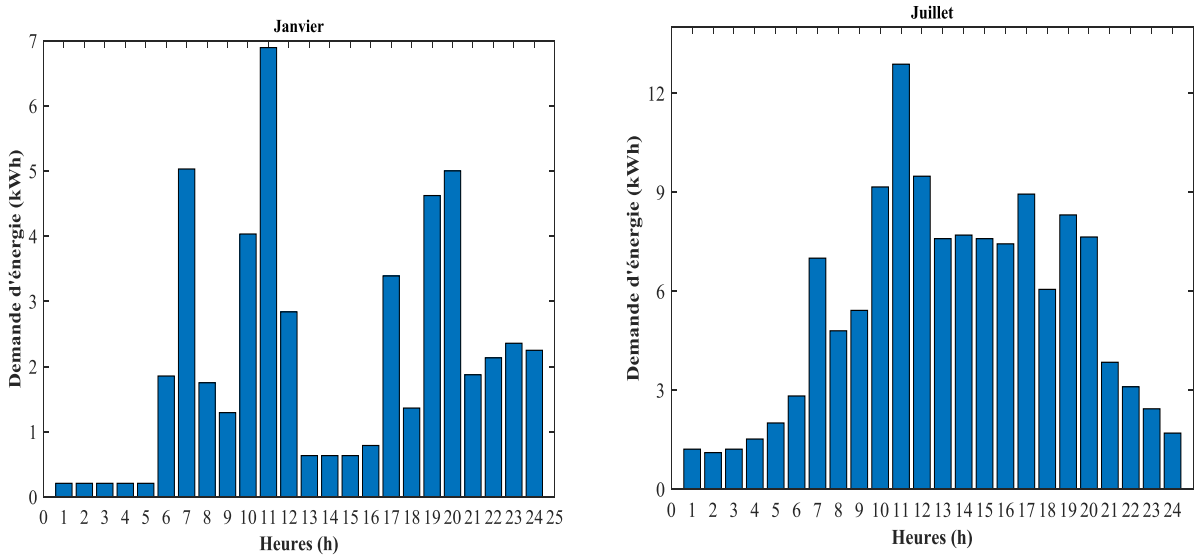


Figure 6.8: Profils d'énergie journalière consommée.

D'après la figure ci-dessus, nous observons des variations des profils pour les jours de la semaine, les week-ends et aussi entre les saisons. Dans un premier temps nous remarquons une diminution de l'énergie entre les profils de l'hiver et de l'été qui est principalement due à la climatisation. Ensuite, dans le cas des profils de l'hiver, nous remarquons des pics importants de consommation le matin (entre 7 et 12h) et le soir (entre 17et 20h). Ceux-ci correspondent aux heures des repas et de chauffage qui se déroulent en même temps. Dans le cas des profils de l'été, nous distinguons des pics importants de consommation (entre 7 et 22h). Ceux-ci correspondent aux heures des repas et de refroidissement qui fonctionnent en même temps. La principale source de consommation en hiver est le chauffage, l'eau chaude sanitaire et les appareils électriques servant à la cuisson. Pour la saison d'été, la principale source de consommation est la climatisation et la cuisson. La consommation d'énergie annuelle de la maison étudié est de 12037.2 kWh / an. Les émissions annuelles de CO_2 sont d'environ 6.6 tonnes.

6.8.2. Détermination du couple de système hybride (N_{wt}, N_{pv}) pour atteindre un bâtiment à énergie positive selon l'approche économique

Après avoir obtenu les besoins énergétiques d'une maison étudiée, une étude comparative sur la détermination du couple de système hybride (le nombre de turbines et le nombre de modules photovoltaïques), qui correspondent au coût minimal de l'installation pour convertir cette maison à une maison à énergie positive.

Deux scénarios sont proposés pour atteindre un bâtiment à énergie positive. Le premier scénario consiste à installé une éolienne de 0.4 kW et du module photovoltaïque polycristallins de puissance crête unitaire de 70 W et le deuxième scénario intègre une éolienne de 0.4 kW et du module photovoltaïque polycristallins de puissance crête unitaire de 240 W.

La figure 6.9 démontre la consommation annuelle d'électricité prélevée du réseau électrique dans les deux scénarios.

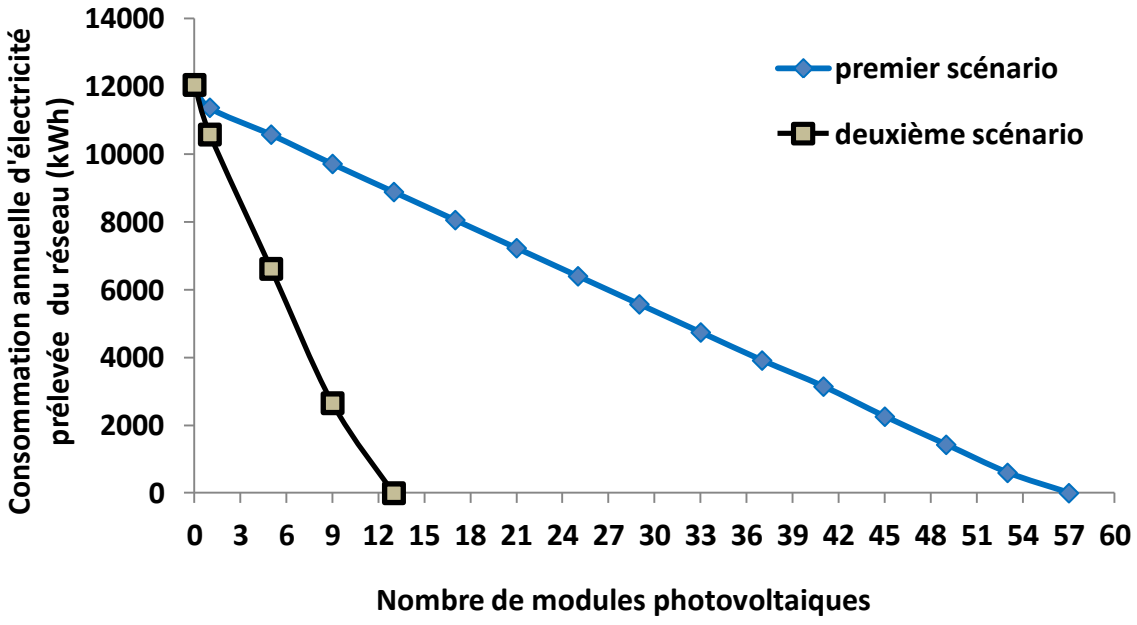


Figure 6.9: Consommation annuelle d'électricité prélevée du réseau électrique.

Le premier couple de système hybride pour atteindre un bâtiment à énergie positive, qui rassemble une éolienne de 0.4 kW et un générateur photovoltaïque poly cristallins d'une puissance de 4 kW composé de 57 modules de puissance crête unitaire de 70 W, qui

correspond à une surface de 29.07 m^2 de toiture. Le deuxième couple comprend une éolienne de 0.4 kW et un générateur photovoltaïque poly cristallins d'une puissance de 3.12 kW composé de 13 modules de puissance crête unitaire de 240 W, qui correspond à une surface de 20.93 m^2 de toiture. A partir des ces deux couples nous pouvons atteindre un habitat à énergie positive.

6.8.3. Premier scénario

Dans les bâtiments à énergie positive, la production annuelle d'énergie renouvelable est supérieure à la consommation annuelle pour tous les usages domestiques. La figure 6.10 représente l'énergie mensuelle consommée et l'énergie produite mensuellement par le système hybride par le premier scénario décrit dans les paragraphes précédents.

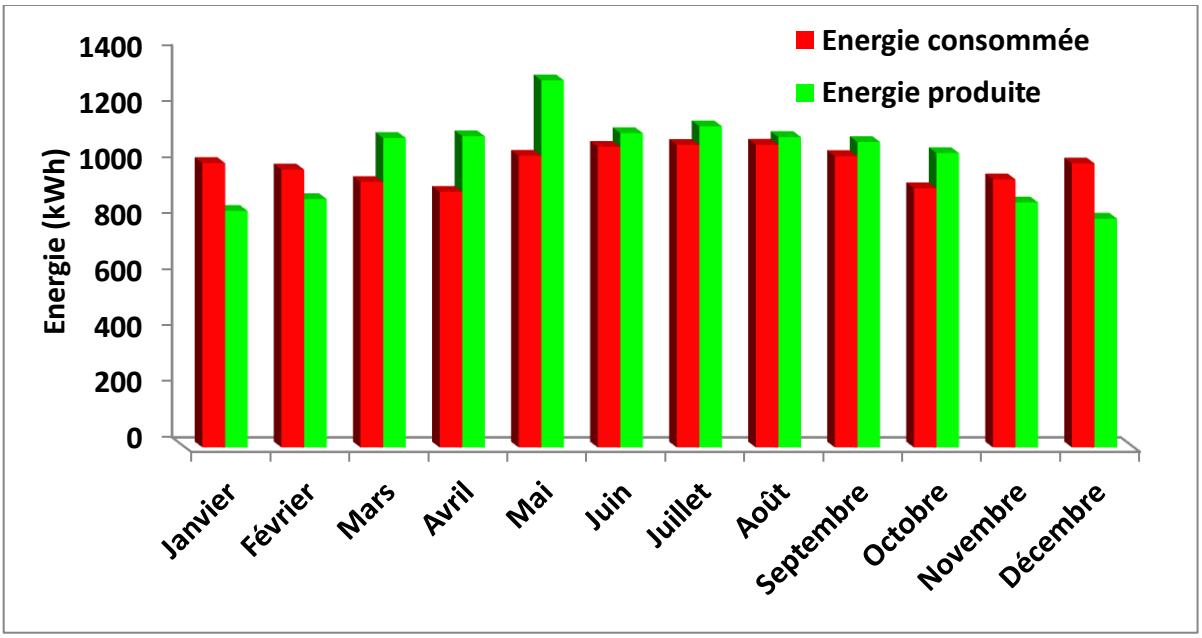


Figure 6.10. Energie mensuelle consommée et l'énergie produite mensuellement par le premier scénario.

Dans le cas du premier scénario, l'intégration de ce système hybride dans l'habitat étudié permettra la production d'une énergie annuelle d'environ 12267 kWh. Dans ce cas et sur une base annuelle, l'énergie produite dépasse la consommation totale du bâtiment (12037.2 kWh), donc, le but à atteindre un bâtiment à énergie positive a été réalisé. Nous aurons un excès d'énergie annuelle d'environ 230 kWh (qui correspond à presque 25.3 €/an) et qui représente environ 2 % de la consommation annuelle du bâtiment que nous pouvons le

revendre au réseau de distribution. La consommation d'énergie mensuelle des bâtiments, l'énergie produite mensuellement et les émissions de CO_2 évitées sont énumérés dans le tableau 6.5.

Tableau 6.5: Consommation d'énergie mensuelle des bâtiments, l'énergie produite mensuellement et les émissions de CO_2 évitées par le premier scénario.

Mois	Consommation d'énergie (kWh)	Energie produite (kWh)	CO_2 évité (ton)	Surplus (kWh)
Janvier	1015.25	844.24	0.46	-171
Février	992	886.66	0.48	-105.33
Mars	947.67	1104.96	0.6	157.29
Avril	912.8	1111.19	0.6	198.39
Mai	1041.38	1310.73	0.71	269.35
Juin	1072.96	1021.94	0.61	48.98
Juillet	1080.41	1046.59	0.62	66.17
Août	1080.34	1108.08	0.6	27.62
Septembre	1040.12	1090.65	0.59	50.53
Octobre	925.62	1050.69	0.57	125.06
Novembre	957	874.74	0.47	-82.26
Décembre	1013.7	816.57	0.44	-197.12
Annuel	12037.2	12267.1	6.83	229.9

Sur une base mensuelle et pour le premier scénario (dans le cas de système hybride comprend une éolienne de 0.4 kW et un générateur photovoltaïque polycristallins d'une puissance de 4 kW composé de 57 modules de puissance crête unitaire de 70 W), il y a une pénurie d'énergie pendant les mois d'hiver de Novembre à Février en raison du manque de vent et du faible rayonnement solaire. La pénurie d'énergie maximale de 197.12 kWh se produit en Décembre.

6.8.4. Deuxième scénario

La figure 6.11 représente l'énergie mensuelle consommée et l'énergie produite mensuellement par le système hybride par le deuxième scénario.

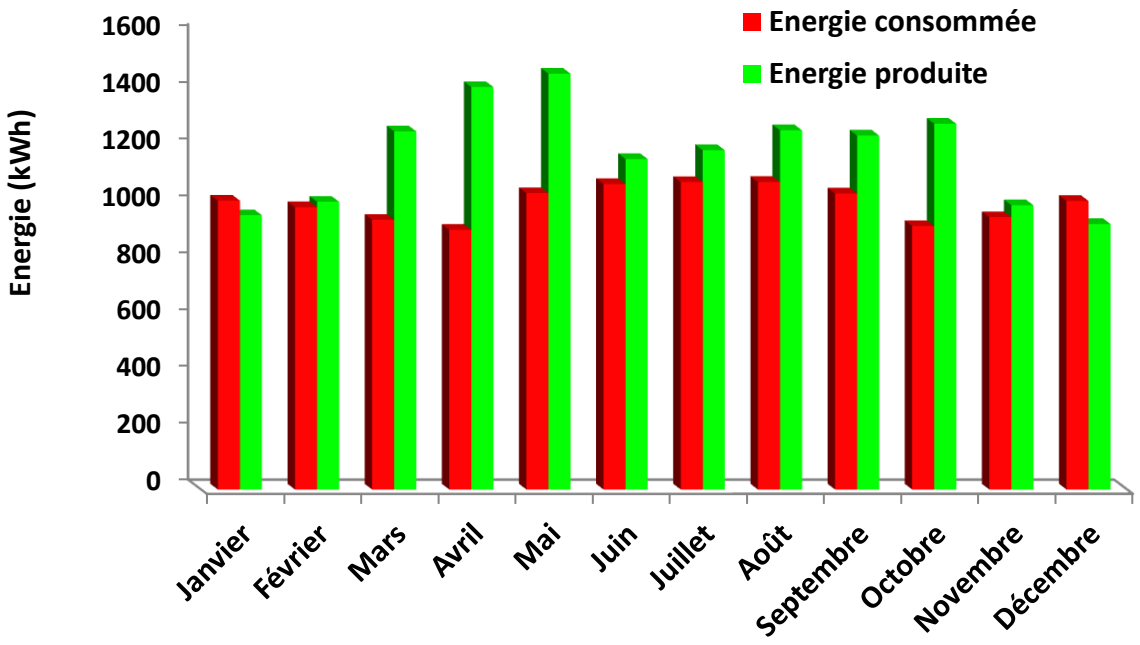


Figure 6.11. Energie mensuelle consommée et l'énergie produite mensuellement par le deuxième scénario.

Dans le cas du deuxième scénario, l'intégration de ce système hybride dans l'habitat étudié permettra de produire une énergie annuelle d'environ 14184.41 kWh. Dans ce cas, l'énergie produite dépasse la consommation totale du bâtiment (12037.2 kWh), donc, nous avons atteint le concept d'un habitat à énergie positive. L'excès d'énergie annuelle réalisé qui est d'environ 2147.21 kWh (qui correspond à presque 236.19 €/an), ce qui représente environ 11% de la consommation annuelle du bâtiment qui peut être revendu au réseau de distribution électrique. La consommation d'énergie mensuelle des bâtiments, l'énergie produite mensuellement et les émissions de CO_2 évitées par ce scénario sont énumérés dans le tableau ci-dessous.

Tableau 6.6: Consommation d'énergie mensuelle des bâtiments, l'énergie produite mensuellement et les émissions de CO_2 évitées par le deuxième scénario.

Mois	Energie consommée (kWh)	Energie produite (kWh)	CO_2 évité (tonnes)	Surplus (kWh)
Janvier	1015.25	963.73	0.52	-51.51
Février	992	1011.13	0.55	19.13
Mars	947.67	1258.39	0.68	310.72
Avril	912.8	1414.07	0.77	501.27
Mai	1041.38	1461.20	0.8	419.82
Juin	1072.96	1161.16	0.63	88.19
Juillet	1080.41	1192.26	0.65	111.84
Août	1080.34	1262.31	0.69	181.96
Septembre	1040.12	1243.6	0.68	203.48
Octobre	925.62	1285.06	0.7	359.43
Novembre	957	998.88	0.54	41.88
Décembre	1013.7	932.58	0.51	-81.11
Annuel	12037.2	14184.41	7.77	2147.21

Pour ce deuxième scénario, sur une base mensuelle, nous remarquons qu'il y a une pénurie d'énergie pendant les mois d'hiver (de Décembre à Janvier). La pénurie d'énergie maximale de 81.11 kWh se produit en Décembre. De plus, ce système hybride permet d'éviter l'émission d'environ 8 tonnes de CO_2 par an. La figure 6.12 illustre l'énergie horaire consommée durant un jour type du mois de Mai.

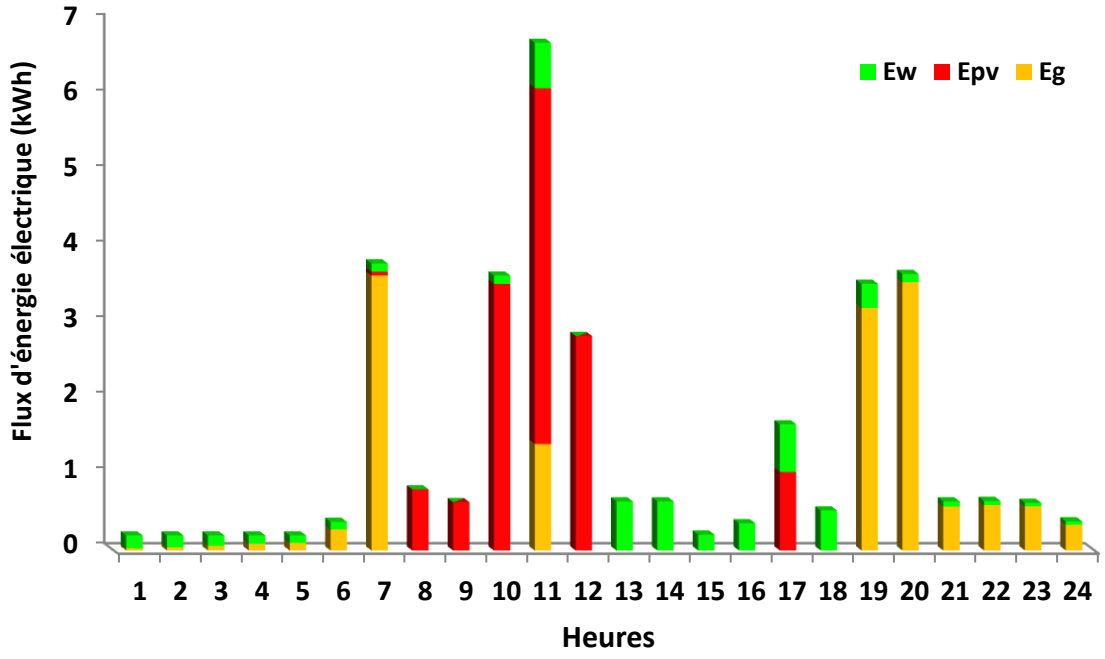


Figure 6.12: Energie horaire consommée durant un jour type du mois de Mai.

Selon le deuxième scenario, nous remarquons que 100 % des besoins électriques journalières proviennent du système hybride (photovoltaïque et éolien), tandis que la grande partie des besoins électriques horaires est prélevée du système hybride et l'autre partie provient en réseau électrique.

6.8.5. Aspect économique

Dans les figures 6.13 et 6.14, le coût de consommation d'électricité, le coût global et le coût du cycle de vie sont tracés en fonction du nombre de modules photovoltaïques pour les deux scénarios.

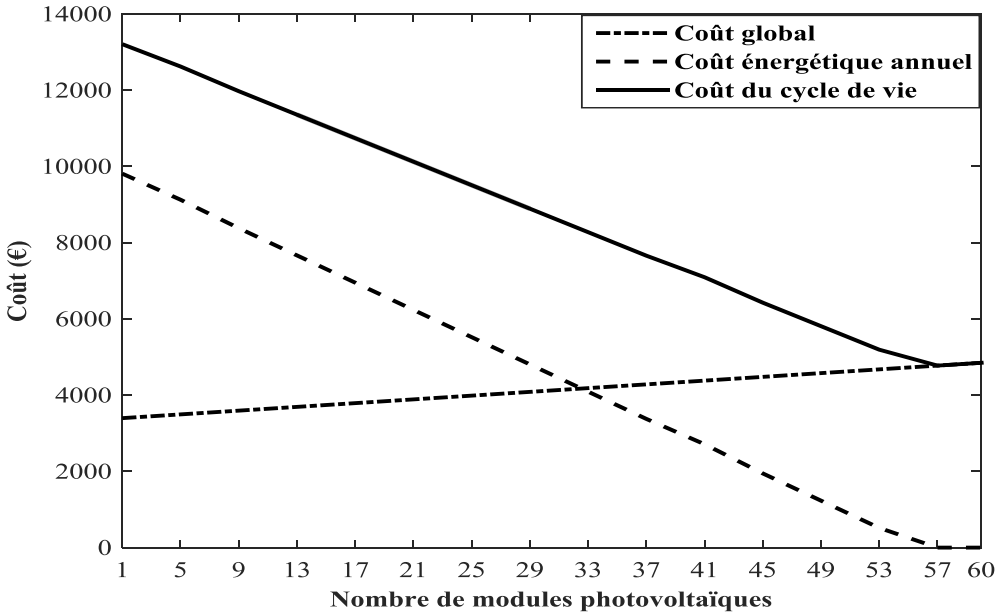


Figure 6.13. Coût du cycle de vie pour le premier scénario (avec tarifs d'électricité).

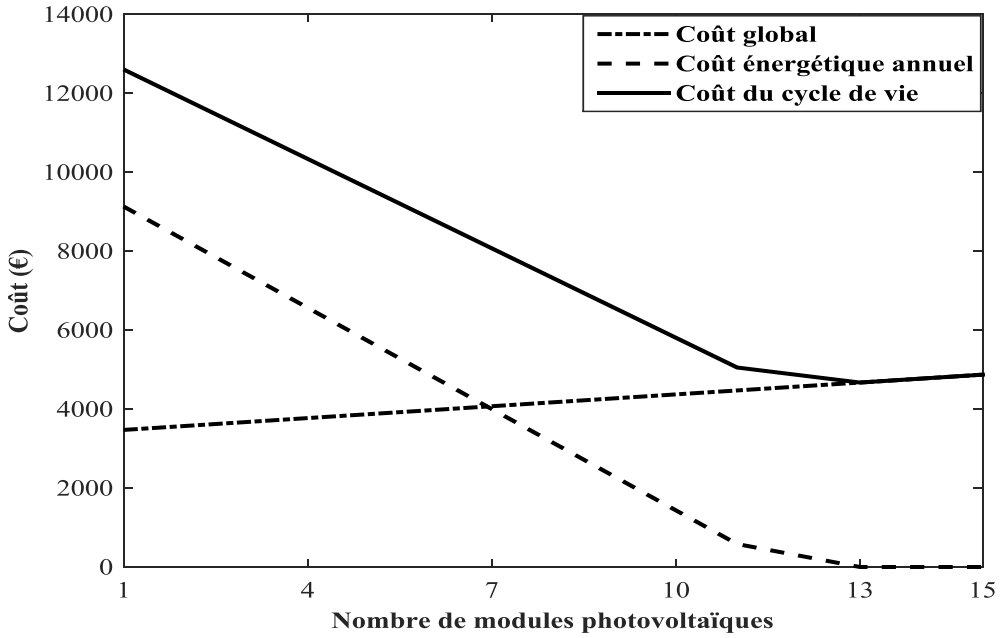


Figure 6.14. Coût du cycle de vie pour le deuxième scénario (avec tarifs d'électricité).

On peut noter que l'augmentation de nombre de modules photovoltaïques pour chaque scénario conduit à la diminution du coût de consommation d'électricité jusqu'à atteindre un

bâtiment à énergie positive. Comme prévu, la courbe de coût du cycle de vie montre un minimum qui correspond au couple optimal des systèmes hybride. Les temps de retour d'investissement pour chaque scénario sont respectivement: 8.4 et 7.5 ans.

L'intégration du système hybride (comprend une éolienne de 0.4 kW et un générateur PV polycristallins d'une puissance de 3.12 kW composé de 13 modules de puissance crête unitaire de 240 W) fournit le meilleur moyen pour arriver à un bâtiment à énergie positive sur une base annuelle car elle, le plus petit période de récupération (7.5 ans) et permet éviter des émissions environ 8 tonnes de CO_2 chaque année. De plus, le système hybride produit le plus haut surplus d'énergie annuelle compare à l'autre système hybride (2147.21 kWh) qui peut être livrés au réseau de distribution électrique.

6.9. Conclusion

Ce chapitre montre la possibilité de convertir un bâtiment individuel consommateur d'énergie vers un bâtiment à énergie positive, cet habitat situé dans la ville de Ouargla. Pour cela, une simulation numérique a été réalisée avec l'outil Matlab; pour l'application de ce modèle, le choix s'est porté sur un bâtiment qui est caractérisé par la haute efficacité énergétique des appareils électroménagers, les systèmes d'éclairage (lampes basses consommation d'énergie), et l'isolation thermique (on intègre les matériaux à changement de phase microencapsulé dans l'enveloppe du bâtiment) ainsi que l'intégration des énergies renouvelables pour compléter les besoins énergétiques du bâtiment. Deux scénarios sont proposés pour convertir le bâtiment en un bâtiment à énergie positive. Pour le premier scénario on utilise un système hybride comprenant une éolienne de 0.4 kW et un module photovoltaïque poly cristallins de puissance crête unitaire de 70 W, et pour le deuxième scénario on utilise un système hybride comprenant une éolienne de 0.4 kW et un module photovoltaïque poly cristallins de puissance crête unitaire de 240 W. Les aspects environnementaux et économique ont été étudies. Dans cette étude nous a permis de tirer de multiples conclusions.

Dans le premier scénario, l'intégration de système hybride qui comporte une éolienne de 0.4 kW et un générateur photovoltaïque poly cristallins d'une puissance de 4 kW composé de 57 modules de puissance crête unitaire de 70 W dans le bâtiment étudié permet la

production d'une énergie annuelle d'environ 12267 kWh et évite l'émission de 7 tonnes/année de CO_2.

Dans le deuxième scénario, l'intégration de système hybride comprend une éolienne de 0.4 kW et un générateur PV polycristallins d'une puissance de 3.12 kW composé de 13 modules de puissance crête unitaire de 240 W dans l'habitat étudiée a permis de produire une énergie annuelle d'environ 14184.41 kWh et évite environ 8 tonnes/an d'émissions de CO_2.

Donc on peut conclue que le deuxième scénario présente le meilleur moyen pour atteindre d'un bâtiment à énergie positive sur une base annuelle, car la période de récupération est la plus petit (7.5 ans) et permettra d'éviter des émissions de CO_2 de d'environ 8 tonnes chaque année. De plus, le système hybride produit le plus haut surplus d'énergie annuelle par rapport l'autre système hybride (2147.21 kWh) qui peut être livrés au réseau de distribution électrique.

Conclusion Générale

Conclusion générale

L'efficacité énergétique est rapidement devenue l'un des grands enjeux de notre époque et les bâtiments en sont une des composantes majeures. Ils consomment plus d'énergie que tout autre secteur et contribuent donc dans une large mesure au changement climatique. Le gouvernement Algérien s'est fixé l'objectif ambitieux et encourage de plus en plus les technologies d'efficacité énergétique pour les prochaines décennies. Cette thèse s'est intéressée au développement d'une méthodologie de conception de bâtiments à énergie positive en Algérie, qui constitue un enjeu considérable de développement durable

Dans un premier temps, nous rappellerons dans cette conclusion les principaux apports des chapitres constitutifs de cette thèse. Nous évoquerons finalement des perspectives pour poursuivre ces travaux.

Dans le premier chapitre, nous avons présenté le contexte énergétique Mondial et Algérien, l'augmentation de la demande mondiale en énergie, la raréfaction des ressources énergétiques fossiles et le changement climatique amorcé au cours des dernières décennies sont des réalités indéniables. Dans ce contexte énergétique, la mise en œuvre de mesures concrètes en faveur d'une plus grande sobriété énergétique de nos sociétés devient urgente. Dans la transition énergétique à opérer, le secteur résidentiel occupe une place de choix. La contribution des énergies renouvelables dans la régulation de ce défi est primordiale. L'intégration des énergies renouvelables nous permet d'une part, de garder un environnement propre et sain et d'autre part, assurer la protection de la biodiversité.

Le problème énergétique de l'Algérie est un problème qui se pose en terme de stratégie de valorisation de ses ressources pour les besoins du développement du pays, de choix d'une véritable politique énergétique à long terme et de définition immédiate d'un modèle cohérent de consommation énergétique couvrant le court et le moyen terme, avant la date fatidique de l'épuisement de ces ressources fossiles stratégiques. Dans ce contexte, la loi algérienne sur la maîtrise de l'énergie et les nouveaux textes réglementaires mis en place récemment sont venus fixer le modèle de consommation énergétique national et définir le cadre général des différentes actions à mener pour parvenir le plus rapidement possible à une rationalisation de l'emploi des énergies disponibles et à une meilleure maîtrise de la consommation énergétique. Outre la nécessaire diversification énergétique qui vise essentiellement une rapide intégration des énergies renouvelables (solaire photovoltaïque et thermique, éolienne, géothermique, biomasse)

dont dispose en abondance l'Algérie, le développement des économies d'énergie est un axe très important de la démarche préconisée par cette loi. La consommation d'énergie peut être considérablement réduite par l'adoption de stratégies d'efficacité énergétique dans le bâtiment.

Pour le deuxième chapitre, l'étude de l'interaction entre climat et bâtiment a été faite, et l'enveloppe est, naturellement, le lieu privilégié des relations entre espaces intérieurs et extérieurs. Il s'agit alors, de gérer simultanément le rôle que joue la paroi du bâtiment et celui qu'elle assure comme élément de contrôle des échanges intérieurs/extérieurs. Par conséquent, ce qui est à retenir de ce chapitre, est que beaucoup de facteurs peuvent affecter l'environnement intérieur, tels que les sources de chaleur et d'humidité, la conception thermique de la structure, l'effet d'autres bâtiments, l'élément végétal, etc. qu'il faut prendre en considération. De ce fait, pour une conservation d'énergie, une protection optimale de l'environnement et un confort maximum, il est essentiel de bien maîtriser ces paramètres. L'architecture bioclimatique insiste sur l'optimisation de la relation qui existe entre le bâtiment et le climat en vu de créer des ambiances confortables par des moyens spécifiquement architecturaux, pour exploiter les effets bénéfiques de ce climat tout en offrant une protection de ses aspects négatifs.

Dans le troisième chapitre, on a étudié le comportement thermique d'une paroi contenant un MCP pour réaliser le confort thermique et économisé de l'énergie dans les bâtiments en été. Pour cela, une simulation numérique a été réalisée avec l'outil Matlab sur différents types de paroi. Le travail entrepris dans cette étude s'est fait en deux parties essentielles. Dans la première partie, on a étudié le comportement thermique d'une paroi en plâtre contenant trois types différents de MCPs (Eicosane, $Na_2CO_3.10H_2O$ et $CaCl_2.6H_2O$ et) avec des concentrations variables pour effectuer le choix technico-économique d'un matériau à changement de phase.

La deuxième partie a été dédiée à l'étude de l'effet d'orientation sur la température intérieure d'un mur vertical, et la détermination de la concentration optimale pour le MCP choisi pour différentes orientations de mur sous les conditions climatiques de la ville de Ouargla. Les résultats obtenus ont mis en évidence :

- Le $CaCl_2.6H_2O$ donne de bons résultats comparé avec les autres MCPs étudiés. L'augmentation de pourcentage de MCP permet d'augmenter l'inertie thermique.
- Un déphasage entre la température maximale sans MCP et la température maximale avec MCP est apparu pour différentes concentrations. Pour le $CaCl_2.6H_2O$, le déphasage est

fonction de la concentration à atteint un déphasage maximum de 7 heures à partir d'une concentration de 15%.

- Le mur proposé avec une concentration de $CaCl_2.6H_2O$ présente pour toutes les orientations une réduction significative des fluctuations de la température sur la surface intérieure comparée au mur sans MCP. Nous remarquons aussi que les températures de la surface intérieure du mur orienté Nord ont des valeurs inférieures à celles des murs Est, Sud et Ouest pour le jour type choisi. Les écarts de températures maximales et minimales du mur avec et sans MCP (concentration égale à 15%) pour les orientations Nord, Sud, Ouest et Est sont respectivement égales à 8.07, 9.06, 9,68 et 8.82.
- Les orientations Ouest et Sud fournissent des charges de transmission de chaleur et de refroidissements égaux et qui sont les plus forts comparés aux orientations de l'Est et du Nord. La charge de refroidissement la plus faible est donnée pour le mur exposé au Nord.
- Une étude d'optimisation technico-économique a permis d'obtenir une concentration optimale du MCP pour chaque orientation de 15%.
- le temps de retour de l'investissement pour les orientations Ouest/ Sud, Est, et Nord est respectivement de 10.51, 9.14 et 8.51 ans.

Les résultats nous ont permis aussi de conclure que l'orientation Nord considérée est la plus favorable, car elle reçoit le minimum de charge de transmission en été. Nous remarquons aussi qu'à partir d'une concentration de MCP égale à 25%, l'effet de l'orientation des parois extérieures sur sa température intérieure est inexistant.

Le quatrième chapitre, vise à établir un aperçu sur les modèles de prospective énergétique existants et analyser les forces et les faiblesses de chaque modèle. On a vu ensuite qu'outre les méthodes de modélisation bottom-up et top-down, il existe aussi un nombre important d'approches de modélisation hybrides. Tous ces modèles ont bien entendu leurs avantages et leurs limites. Dans cette étude, nous recourons à l'approche bottom-up puisque qui présente plusieurs avantages clés qui en font certainement l'outil le plus approprié. Il se présente comme un modèle robuste conçu pour répondre aux besoins multiples et évolutifs des politiques énergétiques, notamment dans le secteur résidentiel.

Dans le cinquième chapitre, nous avons présenté une approche bottom-up pour la modélisation et la prévision de la demande énergétique du secteur résidentiel en Algérie à l'horizon 2040. Le point de départ pour développer les projections de la consommation d'énergie est établi par la demande d'énergie de différents usages finaux pour l'année de base 2008. Dans

cette étude, deux scénarios ont été construits, un scénario tendanciel et un autre volontariste. Le résultat dans le scénario tendanciel montre une augmentation de la consommation d'énergie pouvant atteindre 2.9% par an de 73.23 TWh en 2008 jusqu'à 179.78 TWh en 2040. Cette évolution est essentiellement due à la croissance rapide du nombre de bâtiments confortables et de l'expansion rapide de l'utilisation des appareils électriques.

La réalisation d'un scénario volontariste avec l'intégration des systèmes plus performant (LBC pour l'éclairage et système à absorption pour le refroidissement) permet de minimiser la facture énergétique et économique au niveau du citoyen et ainsi de contribuer à la préservation des ressources énergétiques, notamment le gaz naturel. En outre, la prévision de la demande énergétique et l'analyse des scénarios permettant de considérer différentes conditions possibles dans le secteur résidentiel à l'avenir. Cette approche constitue un volet fondamental pour un processus de planification des politiques de maîtrise de la demande.

Le sixième et dernier chapitre montre la possibilité de convertir un bâtiment individuel consommateur d'énergie vers un bâtiment à énergie positive, cet habitat situé dans la ville de Ouargla. Pour cela, une simulation numérique a été réalisée avec l'outil Matlab; pour l'application de ce modèle, le choix s'est porté sur un bâtiment qui est caractérisé par la haute efficacité énergétique des appareils électroménagers, des systèmes d'éclairage (lampes basses consommation d'énergie), et de l'isolation thermique (on intègre les matériaux à changement de phase microencapsulés dans l'enveloppe du bâtiment) ainsi que l'intégration des énergies renouvelables pour compléter les besoins énergétiques du bâtiment. Deux scénarios sont proposés pour convertir le bâtiment vers un autre à énergie positive. Pour le premier scénario, on utilise un système hybride comprenant une éolienne de 0.4 kW et un module PV poly cristallins de puissance crête unitaire de 70 W, et pour le deuxième scénario on utilise un système hybride comprenant une éolienne de 0.4 kW et un module PV poly cristallins de puissance crête unitaire de 240 W. Les aspects environnementaux et économiques ont été étudiés. Cette étude nous a permis de tirer de multiples conclusions.

Dans le premier scénario, l'intégration de système hybride qui comporte une éolienne de 0.4 kW et un générateur PV poly cristallins d'une puissance de 4 kW composé de 57 modules de puissance crête unitaire de 70 W dans le bâtiment étudié permet la production d'une énergie annuelle d'environ 12267 kWh et évite l'émission de 7 tonnes/année de CO_2 .

Dans le deuxième scénario, l'intégration de système hybride comprend une éolienne de 0.4 kW et un générateur PV poly cristallins d'une puissance de 3.12 kW composé de 13 modules de puissance crête unitaire de 240 W dans l'habitat étudié a permis de produire une énergie annuelle d'environ 14184.41 kWh et évite environ 8 tonnes/an d'émissions de CO_2.

On peut conclure que le deuxième scénario présente le meilleur moyen pour atteindre l'objectif d'un bâtiment à énergie positive sur une base annuelle, car la période de récupération est la plus petite (7.5 ans) et permettra d'éviter environ 8 tonnes d'émissions de CO_2 chaque année. De plus, le système hybride produit le plus haut surplus d'énergie annuelle par rapport l'autre système hybride (2147.21 kWh) qui peuvent être livrés au réseau de distribution électrique.

Les résultats obtenus répondent à l'objectif de ce travail qui maintient le confort thermique avec une économie d'énergie. Poursuivre les travaux nous recommandons des études suivantes:

- L'intégration des équipements et appareils performants (chauffe-eau solaires)
- L'intégration des systèmes efficaces et passifs tels que, la cheminé solaire.

Bibliographie

Bibliographie

Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de L'Energie (ADEME), 2017. Changement climatique - transition écologique, énergétique. https://www.ademe.fr/particuliers-eco-citoyens/habitation/construire/lisolation/isoler. (consulté le 30 Mai 2017).

Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de L'Energie (ADEME), 2015. Base carbone. www.ademe.fr. (consulté le 18 Mars 2017).

Agence Internationale de l'énergie (AIE), 2016. Perspectives énergétiques mondiales.

Agence Internationale de l'énergie (AIE), 2017. Statistiques mondiales clés de l'énergie.

Agence Nationale pour la Promotion et la Rationalisation de l'Utilisation de l'Energie (APRUE), 2015. http://www.aprue.org.dz/. (Consulté le 12 Février 2016).

Ahmad M, 2004. Nouveaux composants actifs pour la gestion énergétique de l'enveloppe légère des bâtiments, Thèse de Doctorat. Université Joseph Fourier, Grenoble.

Allibe B, 2012. Modélisation des consommations d'énergie du secteur résidentiel français à long terme - Amélioration du réalisme comportemental et scenarios volontaristes. Thèse de doctorat. Ecole des Hautes Etudes en Sciences Sociales (EHESS). France.

Alajmi A, Ziyan H., Adel Ghoneim. 2016. Achieving annual and monthly net-zero energy of existing building in hot climate. Applied Energy;165:5 11-521.

Amara A, 2016. The future of Gas Markets. Ministre de l'Energie, des Mines, de l'Eau et de l'Environnement. Rabat, Maroc.

Analytical Reagents and standards, 2010. Biochim, Algérie.

Aschehoug Q, Ntnu, Perino N.M, Torino P, 2009. Expert Guide -Part 2 Responsive Building Elements. IEA ECBCS, Italy.

Assoumou E. 2006. Modélisation Markal pour la planification énergétique long terme dans le contexte français. Thèse de doctorat. Ecole des Mines de Paris. France.

Atlas mondial Encarta, 2012.

Bailly L, 2010. Cellules photovoltaïques organiques souples a grande surface. Thèse de doctorat. Université Bordeaux I.

Benradouane N.R, 2010. Modélisation des estimations énergétiques d'une maison photo-solaire. Apport photothermique sur sites de Tlemcen et Bouzereah. Thèse doctorat. Université Abou-Bakr Belkaïd , Tlemcen.

Bentouba S, Slimani A, Boucherit M S, Hamouda M, 2010. L'énergie renouvelable en Algérie et l impact sur l'environnement. Journal of Scientific Research N° 0 vol. 1.

Berrached L, 2011. Etude prospective de la demande d'énergie finale pour l'Algerie à l'horizon 2030. Mémoire de magister, Université Boumerdes.

Blervaque H, 2014. Règles de modélisation des systèmes énergétiques dans les Bâtiments Basse Consommation. Thèse doctorat, Paris, France.

Bogaert H, 2004. Perspectives énergétiques pour la Belgique à l'horizon 2030.

Bolattürk A, 2006. Determination of optimum insulation thickness for building walls with respect to various fuels and climate zones in Turkey. Applied Thermal Engineering; 26:1301-1309.

Borreguero A. M, Sanchez M.L, Valverde J.L, Carmona M, Rodiguez J.F, 2010. Thermal testing and numerical simulation of gypsum wallboards incorporated with different PCMs content, Applied Energy; 88: 930-7

Bouharchouche A, Bouabdallah A, Berkouk E.M, Diaf S, et Belmili H, 2014. Conception et réalisation d'un logiciel de dimensionnement d'un système d'énergie hybride éolien-photovoltaïque, Revue des Energies Renouvelables. 17 N°3: 359 -376

Boulet S. 2010. Caractérisation du confort hygrothermique et acoustique dans les constructions à base de bois, Thèse Doctorat. Université de Savoie.

Boutarfa N, 2012. Algeria Future Energy. Société du groupe Sonelgaz.

Bouzaïane L, Mouelhi R. 2008. Initiation aux concepts de base de la prospective. Université Virtuelle de Tunis.

BP Statistical Review of World Energy, 2016.

BP Statistical Review of World Energy, 2017.

Cabeza L.F, Castell A, Barreneche C, Gracia A.D, 2011 Fernandez A.I, Materials used as PCM in thermal energy storage in buildings: A review. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 15:1675-1695.

Cabeza L.F, Svensson G, Hiebler S, Mehling H, 2003. Thermal performance of sodium acetate trihydrate thickened with different materials as phase change energy storage material, Applied Thermal Engineering, 23:1697-1704.

California Energy Commission, 2009. Integrated Energy Policy Report, Final Commission Report. Sacramento, California, U.S.A.

Cañete M. A, 2015. Notre planète, notre avenir, Lutter ensemble contre le changement climatique, Union européenne.

CEA, 2016. Mémento sur l'énergie. Institut de technico-économie des systèmes énergétiques Direction des analyses stratégiques.

Centre de Développement des Energies renouvelables (CDER), 2012. Programme triennal d'efficacité énergétique 2011-2013. http://portail.cder.dz/spip.php?article2861.

Centre de Recherche des Energies Renouvelables (CDER), 2014. Prix du panneau photovoltaïque en Algérie. Portail Algerien des Energies renouvelables. http://portail.cder.dz/spip.php?article3925.

Centre de Recherche des Energies Renouvelables (CDER), 2015. Nouveau programme national sur l'efficacité énergétique (2016-2030).

Centre National de Recherches Intégrées du bâtiment CNERIB, 2011. Réglementation thermique du bâtiment.

Certu, 2003. Le confort thermique, Mémento technique du bâtiment.

Chenailler H, 2012. L'efficacité d'usage énergétique : pour une meilleure gestion de l'énergie électrique intégrant les occupants dans les bâtiments. Thèse de doctorat. Université de Grenoble.

Chaturvedi V, Eoma J, Clarke L.E, Priyadarshi Shukla R, 2014. Long term building energy demand for India: Disaggregating end use energy services in an integrated assessment modeling framework. Energy Policy, 64: 226-242.

Chlela F, 2008. Développement d'une méthodologie de conception de bâtiments à basse consommation d'énergie, Thèse doctorat, Université de La Rochelle, France.

Commission de Régulation de l'Electricité et du Gaz (CREG), 2017. http://www.creg.gov.dz/index.php/fr/energies-renouvelables/energies-renouvelables. (consulté le 16 Janvier 2017).

Dabat M.H, Litvine D, Mouras S. 2014. Comprendre, évaluer et prédire la demande d'énergie: un défi pour les pays en développement. Université de Montpellier IART- DeV.

Dagdougui H, Minciardi R, Ouammi A, Robba M, Sacile R, 2012. Modeling and optimization of a hybrid system for the energy supply of a ''Green'' building, Energy Conversion and Management 64: 351–363.

Dahouénon M. A, 2011. Le manuel du technicien photovoltaïque. Hann Maristes-BP3869.

Daouas N, Hassen Z, Ben Aissia H, 2010. Analytical periodic solution for the study of thermal performance and optimum insulation thickness of building walls in Tunisia, Applied Thermal Engineering, 30: 319-326.

Deniger M. A, 2012. Les approches et les stratégies gouvernementales de mise en œuvre des politiques éducatives. Université de Montréal, Québec, Canada.

Deval J.C, 1984. Le confort thermique en climat tempéré. Revue phy. Appl, 19: 513-531.

Djelloul A, Draoui b, Moummi, 2013. Simulation du comportement énergétique des bâtiments résidentiels au sud Algérien. Courrier du Savoir – N°17: 113-119.

Doub E, 2009. Solar Harvest: City of Boulder's First Zero Energy Home. Boulder, Colorado, U.S.A.: Ecofutures building, Inc.

Exxonmobil, 2017. Perspectives Énergétiques 2017 à l'horizon 2040, Exxon Mobil Corporation Corporate Headquarters 5959 Las Colinas Blvd. Irving, Texas 75039-2298 exxonmobil.com

Farid M.M, Khudhair M.A, Razack S.A, Al-Hallaj S, 2004. A review on phase change energy storage: materials and applications, Energy conservation and management, 45:1597-1615.

Florida Solar Energy Center, 2007. ZEH Lakeland Florida. www.fsec.ucf.edu/en/. (consulté le 20 Mars 2017)

Fontaine N. 2003. Livre blanc sur les énergies. www. Debat- energie.gouv.fr

Ghedamsi R, 2013. Elaboration d'un matériau de construction en vue de l'isolation thermique des bâtiments. Mémoire de Magister, Université Ouargla.

Ghedamsi R, Settou N, Gouareh A, Khamouli A, Saifi N, Recioui B, Dokkar B, 2016. Modeling and forecasting energy consumption for residential buildings in Algeria using bottom-up approach, Energy and Buildings; 121:309-317.

Ghedamsi R, Settou N, Gouareh A, Khamouli A, Saifi N, Recioui B, 2015b. Estimating the energy consumption in building sector in Algeria using bottom-up model. IEEE publication, DOI: 10.1109/IREC.2015.7110942.

Ghedamsi R, Settou N, Saifi N, Dokkar B, 2014. Contribution on buildings design with low consumption of energy incorporated PCMs, Energy Procedia; 50: 322-332.

Ghedamsi R, Settou N, Saifi N, Rahmouni S, Dokkar B, Recioui B, 2015a. Numerical simulation of wallboards constructive incorporated with different PCMs content solutions for passive cooling in southern of Algeria, Progress in Clean Energy - Volume 2: Novel Systems and Applications, Springer.

Godet M, 1977. Crise de la prévision, essor de la prospective. Presses Universitaires de France.

Godet M, 1983. Méthode des scénarios.

Gouveia J.P, Fortes P, Seixas J, 2012. Projections of energy services demand for residential buildings: insights from a bottom-up methodology, Energy , 47: 430-442.

Gouareh A, Settou N, Khalfi A, Recioui B, Negrou B, Rahmouni S, Dokkar B, 2015. GIS based analysis of hydrogen production from geothermal electricity using CO2 as working fluid in Algeria, International journal of hydrogen energy, 40:15244-15253.

Gouareh A, 2017. Maîtrise et optimisation de la gestion énergétique en Algérie. Thèse de doctorat. Université de Djillali Liabes de Sidi Bel Abbes, Algérie.

Guellil M.S, 2016. Modélisation dynamique de la Trajectoire Energétique: Analyse de la relation causale par le Recours à la Cointégration en données de Panel. Thèse de doctorat, Tlemcen, Algérie.

Guemache H. 2012. Gaz de schiste : l'Algérie prête à se lancer dans son exploitation. http://www.latribune.fr/entreprises-finance/industrie/energie environnement/20120319trib000689073/gaz-de-schiste-l-algerie-prete-a-se-lancer dans-son exploitation.html. (consulté le 11 Mars 2015).

Heraou A, 2011. Evolution des politiques de l'habitat en Algérie le L.S.P comme solution a la crise chronique du logement cas d'étude la ville de chelghoum laid.

Institut Fraunhofer de recherche solaire européen (ISE), 2000. La maison solaire énergétiquement autarcique de Fribourg.

Journal officiel de la république algérienne N° 23, 2014. Tarifs d'achat garantis.

Kaabeche A, Belhamel M, Ibtiouen R, 2011. Sizing optimization of grid-independent hybrid photovoltaic/wind power generation system, Energy, 36:1214-1222.

Kaabeche A, Belhamel M, Ibtiouen R, 2011. Techno-economic valuation and optimization of integrated photovoltaic/wind energy conversion system, Solar Energy, 85:2407-2420.

Kapsalaki M, Leal V, Santamouris M, 2012. A methodology for economic efficient design of Net Zero Energy Buildings. Energy and Buildings, 55:765-778.

Kapsalaki M, 2012. Economic-efficient design of residential net zero energy buildings with respect to local context. Thèse de doctorat. Université de Porto, Portugal.

Kaynakli O, 2008. A study on residential heating energy requirement and optimuminsulation thickness. Renewable Energy, 33:1164-1172.

Kissock J.K, Hannig J.M, Whitney T.I, Drake M.L, 1998. Early results from testing phase change wallboard, IEA annex 10, phase change materials and chemical reactions for thermal energy storage first workshop.

Krartia M, Ihm P. 2016. Evaluation of net-zero energy residential buildings in the MENA region. Sustainable Cities and Society, 22:116-125.

Les Échos, 2015. En Algérie, le tour de vis budgétaire risque de susciter une crise sociale. https://www.lesechos.fr/30/12/2015/lesechos.fr/021588565133_en-algerie--le-tour-de-vis-budgetaire-risque-de-susciter-une-crise-sociale.htm. (consulté le 17 Janvier 2016).

Marszal A. J, Heiselberg P, Jensen R. L, Nørgaard J, 2012. On-site or off-site renewable energy supply options? Life cycle cost analysis of a Net Zero Energy Building in Denmark. Renewable Energy, 44: 154.165.

Mattinen M. K Heljo J, Vihola J, Kurvinen A, Lehtoranta S, Nissinen A. 2014. Modeling and visualization of residential sector energy consumption and greenhouse gas emissions. Journal of Cleaner Production, 81:70-80.

Meliouh F. Aoul T.K, 2001. L'habitat espaces et repères conceptuels, Courrier du Savoir - N°01, pp. 59-64.

Ministère de l'habitat, 1993. ENAG - Recommandations Architecturales. Édition Alger.

Ministère de l'Energie (ME), (1980-2004). Bilans énergétiques. http://www.mem-algeria.org (consulté le 27 Janvier 2016).

Ministère de l'Energie (ME), (2005 à 2015). Bilans énergétiques. http://www.mem-algeria.org (consulté le 27 Janvier 2016).

Ministère de l'énergie (ME), 2016. Bilan Energétique National de l'année 2015.

Ministère de l'Énergie et des Ressources naturelles (Québec), 2015. Politique énergétique 2016-2025. Bibliothèque et Archives nationales du Québec.

Moncomble J. E, 2013. Les scénarios mondiaux de l'énergie à l'horizon 2050. Conseil mondial de l'énergie, Suisse.

Monti R, Roubelat F, 1998. La boîte à outils de prospective stratégique et la prospective de défense : rétrospective et perspectives.

Moujalled B, 2007. Modélisation dynamique du confort thermique dans les bâtiments naturellement ventilés. Thèse doctorat. Institut des Sciences Appliquées de Lyon. France.

Mourshed M, 2012. Relationship between annual mean temperature and degree days, Energy and Building, 54: 418-425.

Nations Unies Commission Economique pour l'Afrique Bureau pour l'Afrique du Nord (CEA-AN), 2012. Le secteur des énergies renouvelables en Afrique du Nord : situation actuelle et perspectives, www.uneca-an.org / www.uneca.org (consulté le 17 Mars 2015).

Noguchi M, Athienitis A, Ayoub J, Berneche B, 2008. Net Zero Energy Homes of the Future: A Case Study of the ÉcoTerra House in Canada. Proceedings of the Renewable Energy Congress. Glasgow, Scotland.

Office National des Statistiques-Alger. Recensement Général de la Population et de l'Habitat (RGPH) 2008, 2011. Collections Statistiques n° 163.

Office National de la Météologie (ONM), 2011. Wilaya de Ouargla.

Office National des Statistiques (ONS), 2015. http://www.ons.dz/. (consulté le 5 Janvier 2016).

Ouadah R.S, 2013. La politique de l'habitat en Algérie entre monopole de l'état et son désengagement.

Ouahab. A. 2015. Modélisation des consommations d'énergie et des émissions de CO_2 à long terme appliquée au secteur résidentiel algérien. Thèse doctorat. Université François-Rabelais de Tours, France.

Ouled Henia A, 2003. Choix climatiques et construction. Zones arides et semi arides. Maison à Bou-Saada, Thèse doctorat, Ecole polytechnique fédérale de Lausanne.

Outlook for Energy, 2017. A View to 2040. exxonmobil.com.

Ozel M, 2011. Effect of wall orientation on the optimum insulation thickness by using a dynamic method, Applied Energy, 88: 2429-2435.

Parameshwaran R, Kalaiselvamb S, Harikrishnanb S, Elayaperumal A, 2012. Sustainable thermal energy storage technologies for buildings: A review**,** Renewable and Sustainable Energy Reviews; 16: 2394-2433.

Plassard F, 2003. Rétrospective de la prospective, Recherche soutenue par le Prédit Ministère de l'Equipement, Lyon.

Plassard, F., 2004. Rétrospective de la prospective. Travaux et Recherche de Prospective N° 20.

Programme des énergies renouvelables et de l'efficacité énergétique en Algérie (PNER), 2011. Ministère de l'énergie et des mines, SATINFO, Société du groupe Sonelgaz.

Programme de développement quinquennal 2010-2014, 2010. Réunion du Conseil des ministres.

Rahmouni S, Settou N, Negrou B, Gouareh A, 2016. GIS-based method for future prospect of hydrogen demand in the Algerian road transport sector. International Journal of Hydrogen Energy; 40 (44): 15244-15253.

Recioui B, Settou N, Khalfi A, Gouareh A, Rahmouni S, Ghedamsi R, 2016. Valorization of carbon dioxide by conversion into fuel using renewable energy in Algeria. Transportation Research Part D 43; 145-157.

Recioui Bakhta, 2017. Etude prospective de la récupération d'énergie en Algérie. Thèse de doctorat. Université de Ouargla.

Reed M, Fraser E, Dougill A, 2006. An adaptive learning process for developing and applying sustainability indicators with local communities. Ecological Economics 59, 4: 406-418.

Regin A. F, Solanki S.C, Saini J.S, 2008. Heat transfer characteristics of thermal energy storage system using PCM capsules: A review, Renewable and Sustainable Energy Reviews. 12: 2438-2458.

Ricardo P.C, 2009. Interview by M Kapsalaki.

Saifi N, 2015. Contribution a la conception des bâtiments à faible consommation d'énergie dans les zones arides. Thèse doctorat. Université de Ouargla.

Schéma National d'Aménagement du Territoire (SNAT), 2010.

Sharafi M, Elmekkawy T.Y, Bibeau E.L, 2015. Optimal design of hybrid renewable energy systems in buildings with low to high renewable energy ratio, Renewable Energy; 83: 1026-1042.

Sharma A, Tyagi V.V, Chen C.R, Buddhi D, 2009. Review on thermal energy storage with phase change materials and applications, Renewable and Sustainable Energy Reviews, 13:318-345.

Shekarchian M, Moghavvemi M, Motasemi F, Mahlia T.M.I. Energy saving and cost-benefit analysis of using compression and absorption chillers for air conditioners in Iran. Renewable and Sustainable Energy Reviews 2011; 15:1950-1960.

Sotehi N, 2010. Caractéristiques Thermiques des Parois des Bâtiments et Amélioration de L'isolation, Thèse de doctorat. Université Mentouri - Constantine, Algérie.

Spinner B, Fabre E, 2003. Une politique de recherche et de développement pour des énergies, Action Concertée Energie du CNRS et du Ministère de la Recherche et des Nouvelles Technologies.

Stoyanov L, 2011. Etude de différentes structures de systèmes hybrides à sources d'énergie renouvelables. Thèse de doctorat. Université Technique de Sofia.

Swan L.G, Ugursal V. I, 2009. Modeling of end-use energy consumption in the residential sector: A review of modeling techniques, Renewable and Sustainable Energy Reviews; 13: 1819-1835.

The Outlook for Energy, 2016. A View to 2040.

Touaibi R, Vasilescu E.E, Feidt M, Kheiri A, Abbes M.T, Khelidj B, 2013. Etude paramétrique d'un système de réfrigération par absorption à simple effet utilisant le couple Eau-Bromure de lithium, Efficacité énergétique-sources d'énergies renouvelables-protection de l'environnement COFRET'12, Sozopol, Bulgarie.

Tyagi V.V, Buddhi D, 2007. PCM thermal storage in buildings: A state of art, Renewable and Sustainable Energy Reviews, 11:1146-1166.

Venstermans J, 2010. Des enduits pour une climatisation douce, Revue d'information générale du Centre scientifique et technique de la construction, N° 3.

Viaro M.A, Ziegler A, 1983. Habitat traditionnel dans le monde éléments pour une approche, établissement humains et environnement socioculturel (UNESCO).

Viaro M. A. 1984. Nias: habitat mégalithisme. Archipel, vol: 27, pp.109-148.

Vighetti S, 2010. Systèmes photovoltaïques raccordés au réseau : Choix et dimensionnement des étages de conversion. Thèse de doctorat. Université de Grenoble. Page 10.

Yao R, Steemers K, 2005. A method of formulating energy load profile for domestic buildings in the UK. Energy and Buildings, 37:663-671.

Zalba B, Marin J.M, Cabeza L.F, Mehling H, 2003. Review on thermal energy storage with phase change: materials, heat transfer analysis and applications, Applied Thermal Engineering, 23: 251-283.

Zermane O E, 2012. Modélisation d'une machine frigorifique à absorption : application des équilibres de phases, Thèse de doctorat. Université Mentouri de Constantine.

Zhao C.Y, Zhang G.H, 2011. Review on microencapsulated phase change materials (MEPCMs): Fabrication, characterization and applications. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 15:3813-3832.

Annexes

Annexe chapitre 2.

2.1. Applications des MCP

Les matériaux à changement de phase sont utilisés dans différents domaines : le stockage d'énergie solaire, le refroidissement des boîtes de transport de produits sensibles, les systèmes de mémoires permanentes en informatique (conservation de l'information sans utilisation électrique dans une transition de phase vitreuse/cristalline), les systèmes de climatisation (liquide frigorigènes), intégration aux textiles (régulation thermique corporelle) ainsi que dans le domaine de la construction des bâtiments où ils sont utilisés dans les systèmes passifs et actifs (Ahmad M, 2004), (Zhao C.Y et al, 2011).

2.2. Applications des MCP dans le bâtiment

Les MCP ont l'avantage supplémentaire de maintenir le confort thermique des bâtiments si une température de changement de phase appropriée est choisie. Ainsi les MCP utilisés dans l'habitat auraient une durée de vie égale ou supérieure à celle des bâtiments actuels.

L'utilisation des MCP dans les bâtiments est ancestrale. Elle a pris un regain de plus en plus important au cours de ses dernières années du fait des éléments suivants (Cabeza L.F et al., 2011) :

-La grande différence de consommation d'énergie entre les heures de pointe et les heures creuses, pour le rafraîchissement (été) et pour le chauffage des bâtiments (hiver et saisons intermédiaires);
-L'utilisation croissante de l'énergie solaire : l'énergie solaire thermique est disponible à des moments qui ne coïncident pas nécessairement au besoin. Le stockage d'énergie thermique devient un moyen d'adapter la production et la consommation de cette énergie thermique solaire.

-Une volonté d'utilisation rationnelle plus efficace des unités de production de chauffage et de refroidissement. Il s'agit ici essentiellement de ne consommer de l'énergie électrique que sur des tranches horaires à faible coût, pour utiliser l'énergie produite sur d'autres tranches horaires qui correspondent au besoin. L'utilisation de ces MCP en assistance au chauffage ou au refroidissement est soit passive soit active. Concernant l'utilisation de ceux-ci en assistance au refroidissement (rafraîchissement), une phase de régénération de MCP (solidification) nocturne

est nécessaire, afin d'assurer une capacité de stockage de chaleur diurne quotidienne ; celle-ci peut être passive ou active (renouvellement d'air nocturne par ventilation forcée.

On peut définir quatre méthodes économiques de conditionnement des MCP dans les matériaux communs de structure des bâtiments (Kissock J.K et al, 1998).

1- Incorporation directe de MCP dans le « mélange humide » des matériaux du bâtiment.

2- Incorporation directe par absorption (imprégnation) du MCP fondu dans les matériaux poreux du bâtiment.

3- Incorporation indirecte par encapsulation.

4- Incorporation directe de MCP dans les revêtements (plastiques ou caoutchouc).

2.3. Utilisation passive des MCP en bâtiment

Il s'agit ici de l'utilisation des MCP par intégration de ceux-ci dans les divers éléments constituants un bâtiment : enveloppes du bâtiment, plafonds, plancher, parois, menuiseries, mobiliers, etc. Le stockage et le déstockage d'énergie s'effectue au gré des échanges de chaleur avec l'air intérieur du bâtiment et l'environnement (air extérieur, rayonnement solaire, rayonnement nocturne, etc.). Ces échanges sont passifs, c'est-à-dire non actionnés par un système mécanique, à l'exception parfois d'une ventilation nocturne forcée du bâtiment (Parameshwarana R et al, 2012).

La répartition des MCP dans la paroi (figure 2.1). Elle dépend des objectifs fixés (Aschehoug Q et al, 2009).

- Si l'on désire éviter les surchauffes de la surface extérieure des murs, on placera le MCP proche de la surface extérieure. Celle la solution convient pour réduire la consommation d'énergie de refroidissement et pour maintenir le confort thermique conditionnez à l'intérieur du bâtiment dans les pays chauds pendant la période d'été.

- Si l'on désire réguler la température intérieure, on placera le MCP près de la surface intérieure.

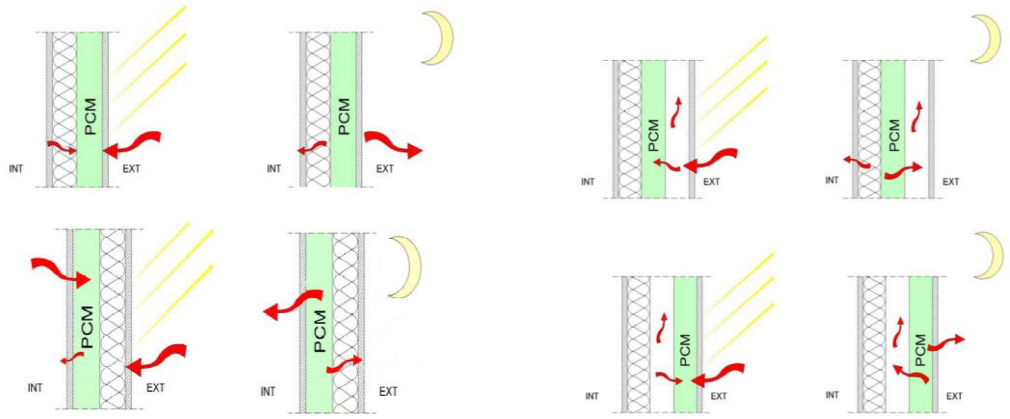


Figure 2.1 La répartition (possible) des MCP dans la paroi (Aschehoug Q et al, 2009).

2.4. Intégration des MCP dans l'enveloppe du bâtiment

Ce type d'intégration est la plus utilisée parmi les utilisateurs passifs des MCP dans le bâtiment parce que la surface d'échange de chaleur est grande. Ils sont capables de combiner les fonctions de stockeur de chaleur et élément de construction. En général, la profondeur de l'échange de chaleur est courte. Ils sont en général installés dans les bâtiments pour contribuer à l'amélioration du rafraîchissement des résidences. Les structures les plus fabriqués sont : les plaques de plâtres, les enduits, les murs trombes à base de MCP et les blocs de béton (Sharma A et al, 2009), (Venstermans J, 2010).

2.5. Plaques de plâtres-MCP

Les plaques de plâtres-MCP sont constituées en général d'un matériau de construction léger et du MCP. 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 plâtres-MCP sont fixées sur les murs sous la forme d'un sandwich composés d'isolant, de polystyrène et du plâtre-MCP (figure 2.2) (Zhao C.Y et al, 2011).

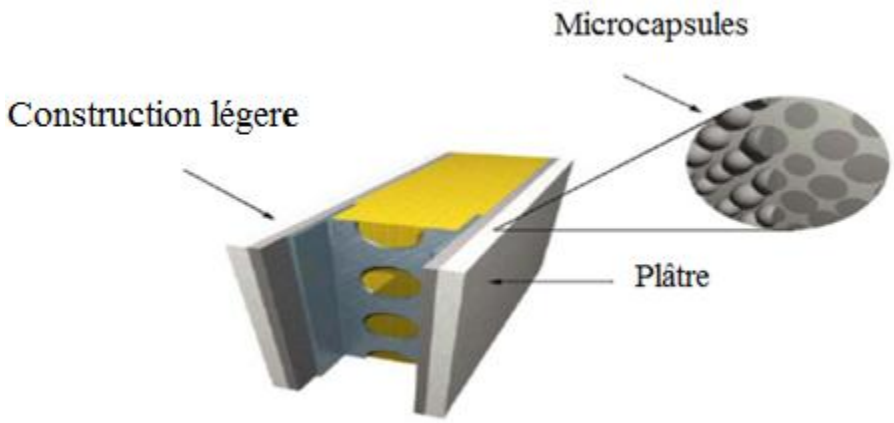


Figure 2.2: Modèle de mur contenant une plaque de plâtre-MCP (Zhao C.Y et al, 2011).

2.6. Enduits à base de MCP

Le CSTC (Centre Scientifique et Technique de la Construction) en Belgique dans le cadre du projet en collaboration avec trois autres centres de recherche (CRM, CENTEXBEL, CERTECH) a mis au point un enduit contenant 30 % en masse de MCP.

Sur le plan expérimental, de nombreuses mesures ont été effectuées sur deux cellules ayant une surface au sol de 9 m² chacune. Elles renfermaient chacune une surface vitrée de 3 m² orientée au sud. L'une d'entre elles étaient revêtue d'enduits à MCP et l'autre avec un enduit traditionnel de même épaisseur de 1.5 cm. Les mesures de températures ont pu être effectuées pour différentes périodes d'ensoleillement (Venstermans J, 2010).

Les premiers 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.

Actuellement sur le marché les enduits à base de MCP (fabriqués par Delta ®, maxitclima, etc.), ilsexistent sous la forme d'un enduit prédosé « prêt-à-gâcher ». Ils sont à appliquer sur une épaisseur d'environ 15 mm.

Une couche de 3 cm de l'enduit maxitclima correspond à la capacité thermique de 8 cm de béton, de 13 cm de plâtre ordinaire ou de 29 cm de briques creuses (Venstermans J, 2010).

2.7. Murs trombes à base de MCP

Les murs trombes à base MCP sont composés d'un mur de maçonnerie ordinaire contenant des MCP espacés de 10 cm environ d'une couche de verre ou d'un vitrage en plastique (figure 2.3).

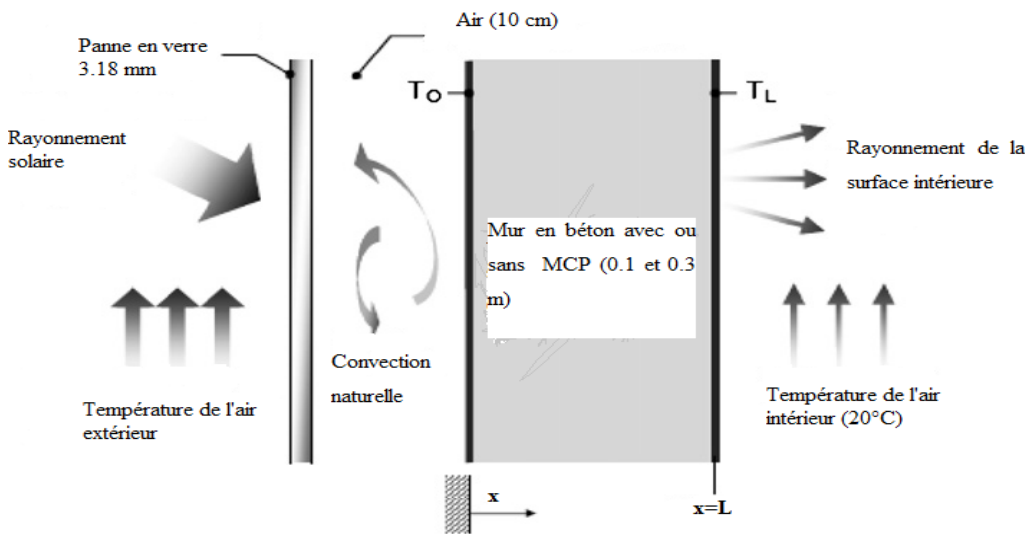


Figure 2.3: Configuration d'un modèle de mur trombe MCP (Sharma A et al, 2009)**.**

Différents MCP ont été expérimentés pour avoir le meilleur rendement thermique d'un mur trombe à base de MCP : Les différents travaux de 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. Ils sont plus légers que les murs trombe traditionnels(Sharma A et al, 2009).

2.8. Blocs de béton-MCP

Le centre d'étude du bâtiment (université de Concordia) à Montréal au Canada a mis au point des blocs de béton à base MCP. Ils ont utilisé différents MCP : la paraffine, stéarate de butyle, dodecanol et polyéthylène. Au cours des différents essais sur le rendement thermique de ces blocs de béton-MCP, il ressort que les blocs de béton-MCP à base de paraffine ont la capacité de stockage d'énergie (par mètre carré) plus importantes que les autres MCP expérimentés (Sharma A et al, 2009).

2. 8. Autres intégrations des MCP dans le bâtiment

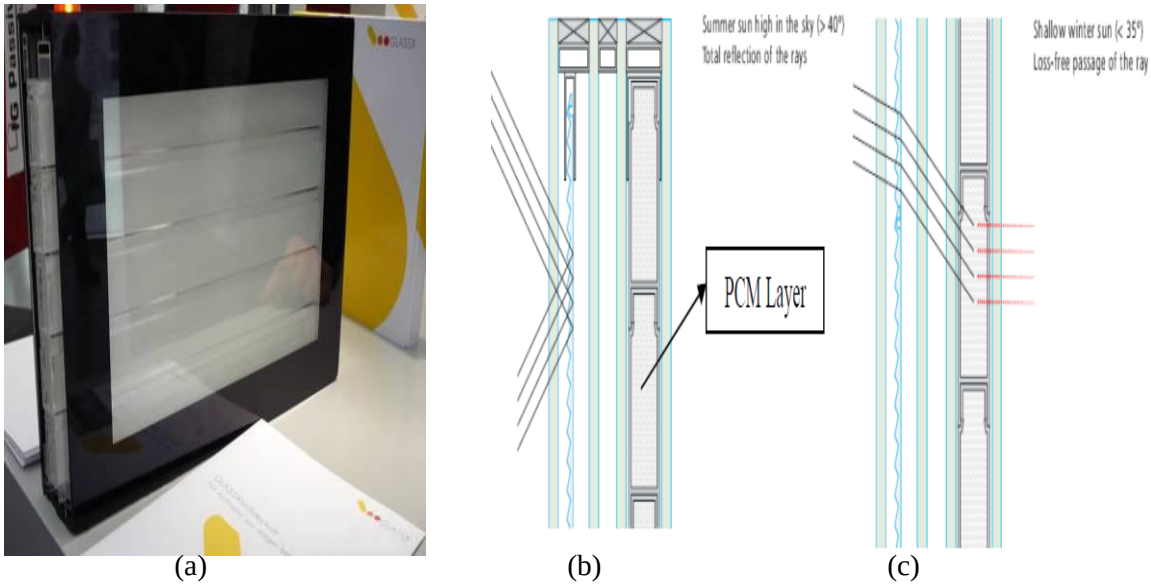
D'autres compartiments du bâtiment sont utilisés pour incorporer les MCP dans les bâtiments. La plupart sont encore au stade expérimental. Les travaux les plus avancés sont l'intégration des MCP dans les fenêtres, les rideaux de fenêtres, le plancher et le plafond (Sharma A et al, 2009).

2.8.1. MCP dans les fenêtres

Les travaux sur les fenêtres à base de MCP les plus connus sont ceux du cabinet architectural Glass X fondé par Dietrich Schwarz. Il a mis au point les fenêtres Glass X. Ces dernières sont composées de quatre éléments au sein d'un seul ensemble fonctionnel : une isolation translucide, une protection contre les surchauffes estivales, un matériau à changement de phase intégré dans des conteneurs 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 aux alentours de 27 °C qui est utilisé. Cette paroi est scellée par un verre de sécurité trempé de 6 mm qui peut être agrémenté d'une sérigraphie esthétique du côté intérieur (figure 2.4 (a)).

Lorsque l'inclinaison du rayonnement solaire est supérieure à 40 °C (été), il y a un réfléchissement total des rayons solaires (figure 2.4 (b)) sur la fenêtre. Lorsque l'inclinaison du rayonnement solaire est inférieure à 35 °C (hiver), les rayons solaires traversent complètement la fenêtre (figure 2.4 (c)).

La capacité de stockage de l'énergie des fenêtres Glass (X) est dix fois plus importante que le béton ordinaire.



(a) (b) (c)

Figure 2.4: Fenêtre glass (X) fabriqué par Dietrich. (a) prototype à l'échelle1, (b) évolution des rayons solaires estivale et (c) évolution des rayons solaires hivernale (Aschehoug Q et al, 2009).

2.8.2. MCP dans les rideaux

Les rideaux à base de MCP sont aussi expérimentés pour améliorer le 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 ce qui permet aux MCP de se solidifier et la salle de se réchauffer (figure 2.5) (Sharma A et al, 2009).

Figure 2.23: Rideaux à MCP (Sharma A et al, 2009).

2.8.3. MCP dans le plafond et dans le plancher

Les produits à base de MCP installés dans les plafonds et les planchers pour améliorer le confort du bâtiment sont en général des panneaux à base de MCP.

Différents fabricants des produits à base de MCP (Solairked, Rubitherm, Cristopia, etc.) proposent un panel de panneaux à base de MCP.

Le panneau le plus connu est le panneau DuPont™ Energain®. Il se présente sous la forme de panneaux avec 2 faces en aluminium dont les extrémités sont recouvertes de ruban adhésif en aluminium (figure 2.6 (a)). Le matériau central est un mélange de copolymère et de cire de paraffine à 60 % qui confère au panneau sa fonctionnalité. Il a une chaleur latente de stockage de 315 kJ/m² et une température de fusion de 22 °C. La dimension des panneaux est de 1000 mm x 1198 mm avec une épaisseur de 5,26 mm. Il pèse environ 5 kg/m². Ces plaques ont la même capacité de stockage de calories qu'un mur de béton de 5 à 7 cm. Ces panneaux peuvent se poser au plafond (figure 2.6 (b)), dans les planchers et aux murs (Zalba B et al, 2003).

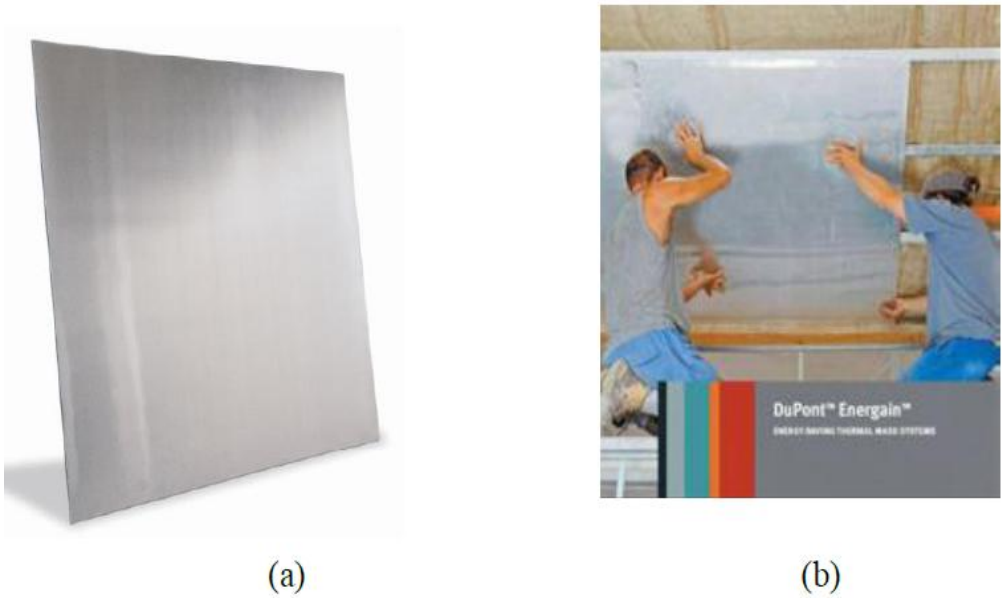


Figure 2.6: Panneau à base de MCP fabriqué DuPont™ Energain®. (a) le modèle que l'on installe au plafond et (b) un exemple de montage de ce panneau dans un plafond (Zalba B et al, 2003).

2.8.4. Utilisation active des MCP en bâtiment

Les systèmes actifs sont des systèmes où la circulation du fluide dans les composants est actionné par un système mécanique (ventilateur, pompe, etc). Ce caractère actif permet d'utiliser la capacité de stockage et/ou de déstockage d'énergie à la demande, c'est-à-dire de façon non subie. Les systèmes actifs sont composés en général de trois éléments :

- l'échangeur de stockage de l'énergie thermique de chaleur latente : LTHES (Latent Heat Thermale Energy Storage) contenant les MCP. C'est l'élément central du dispositif de stockage ;
- le circuit de circulation du fluide (souvent de l'air parfois de l'eau) caloporteur ;

- un ventilateur ou une pompe qui détermine le débit de fluide dans les LTHES.

Les systèmes actifs de types échangeurs de chaleur permettent d'améliorer le confort des bâtiments en faisant circuler de l'air frais (rafraîchissement) ou de l'air chaud (chauffage) dans les bâtiments en fonction de la demande (Zalba B et al, 2003).

Annexe chapitre 3.

3. a. Méthodes de résolution numérique

L'équation différentielle (3.14) a été discrétisée par la méthode explicite de différences finies. Le mur composé est discrétisé dans un certain nombre de nœuds. L'équation peut être traitée numériquement en discrétisant les variables x et t. Le variable T est alors constant dans chaque segment Δx pendant un intervalle de temps Δt. Cette valeur, T_n est associée au nœud n situé au centre du segment n. Les différentielles δT_n et $\delta^2 T_n$ s'écrivent, en utilisant les différences centrales :

$$\delta T_n = T_{n+1/2} + T_{n-1/2} \tag{3.a}$$

$$\delta^2 T_n = \delta(\delta T_n) = \delta T_{n+1/2} + \delta T_{n-1/2} = T_{n+1} - 2T_{n+1} + T_{n-1} \tag{3.b}$$

L'équation (3.14) devient

$$\rho_j C_j \frac{\Delta T_n}{\Delta t} = \frac{k_j}{\Delta x^2}(T_{n+1} - 2T_{n+1} + T_{n-1}) \tag{3.c}$$

En intégrant (de t à $t + \Delta t$) l'équation (3.c) écrite sous sa forme différentielle avec dT_n/dt on obtient

$$\rho_j C_j \Delta x (T_n^+ - T_n^0) = \int_t^{t+\Delta t} \frac{k_j}{\Delta x} S_n dt \tag{3.d}$$

avec

$$T_n^+ = T(t + \Delta t)$$

$$T_n^0 = T(t)$$

$$S_n = T_{n+1} - 2T_{n+1} + T_{n-1} \tag{3.e}$$

Celle-ci peut s'écrire :

$$\int_t^{t+\Delta t} S_n dt = (\mu S_n^0 + (1-\mu) S_n^+)\, \Delta t \tag{3.f}$$

Si $\mu = 1$ (3.f) devient

$$\rho_j C_j \Delta x (T_n^+ - T_n^0) = \frac{k_j}{\Delta x} S_n^0 \Delta t \tag{3.g}$$

C'est cette formulation explicite qui a été utilisée dans les programmes programme afin de procéder à la résolution numérique du modèle direct.

Annexe chapitre 5.

Tableau 5.a. Données énergétiques par station météorologique.

N°	Station	Longitude	Latitude	Besoin énergétique de refroidissement (kWh/m^2)	Besoin énergétique de chauffage (kWh/m^2)	Coût de refroidissement (€/m^2)	Coût de chauffage (€/m^2)
1	Adrar	27.82	-0.18	45.8	16.43	3.6	0.015
2	Ain Sefra	32.77	-0.6	15.45	41.38	1.21	0.038
3	Annaba	36.83	7.82	2.61	29.71	0.21	0.027
4	Batna	35.72	6.35	6.76	52.87	0.531	0.048
5	BEchar	31.63	-2.25	24.74	26	1.944	0.024
6	Bejaia	36.72	5.07	2.07	28.59	0.163	0.026
7	Beni Abbes	30.13	-2.17	40.45	17.91	3.179	0.016
8	Beni-Saf, Tle	35.3	-1.35	5.67	19.04	0,446	0,017
9	Biskra	34.8	5.73	24.51	18.55	1.926	0.017
10	Bordj b. Mokhtar	21.33	0.95	56.64	9.15	4.451	0.008
11	Bordj Bou Arreridj	36.07	4.77	6.86	53.66	0.539	0.049
12	Bou Saada	35.33	4.2	19.78	29.40	1.555	0.027
13	Constantine	36.28	6.62	5.48	50.58	0.431	0.431
14	Dar El Beida	36.68	3.22	4.01	31.19	0.315	0.028
15	Djanet	24.27	9.47	27.98	17.64	2.199	0.016
16	Djelfa	34.33	3.38	6.8	57.79	0.535	0.053
17	El Golea	30.57	2.87	30.96	24.84	2.433	0.023
18	El kheiter	34.15	0.07	10.41	49.45	0.818	0.045
19	El Oued	33.51	6.78	25.37	20.77	1.99	0.77
20	Ghardaia	32.38	3.79	24.54	20.84	1.93	0.77
21	Guelma	36.47	7.47	9.56	32.37	0.75	1.2
22	Hassi-Messaoud	31.67	6.14	33.24	20.31	2.61	0.75
23	Illizi	26.5	8.42	40.16	16.14	3.16	0.6
24	In Amenas	28.05	9.64	30.66	21.83	2.41	0.81
25	In Salah	27.23	2.5	49.84	13.57	3.92	0.5
26	Ksar Chellala	35.17	2.32	12.39	44.1	0.97	1.63
27	Maghnia	34.82	1.78	8.26	36.37	0.65	1.35
28	Mascara-Ghriss	35.21	0.15	7.85	43.26	0.62	1.6
29	Mecheria	33.58	0.28	11.81	47.53	0.93	1.76
30	Medea	36.28	2.73	3.38	56.37	0.27	2.09
31	Miliana	36.31	2.24	6.47	41.48	0.51	1.53
32	Mostaganem	35.88	0.12	3.15	31.83	0.25	1.18
33	Msila	35.67	4.5	18.81	34.31	1.48	1.27
34	Naama	33.27	0.3	11.5	49.84	0.9	1.84
35	Oran / Es Senia	35.63	0.6	2.64	28.26	0.21	1.05
36	Ouargla	31.92	5.41	33.46	19.46	2.63	0.72
37	Oum El Bouaghi	35.87	7.12	6.79	48.4	0.53	1.79
38	Setif	36.18	5.25	4.67	62.22	0.37	2.3
39	Sidi Bel Abbes	35.2	0.62	8.44	43.02	0.66	1.59
40	Souk Ahras	36.28	7.97	0.49	15.28	0.04	0.57
41	Tamanrasset / Aguenna	22.82	5.47	19.93	17.46	1.57	0.65
42	Tebessa	35.43	8.12	7.74	44.66	0.61	1.65
43	Tiaret	35.34	1.46	6.36	60.23	0.5	2.23
44	Timimoun	29.44	0.28	39.66	18.92	3.11	0.7
45	Tindouf	27.7	8.17	31.44	15.04	2.47	0.56
46	Tizi-Ouzou	36.7	4.05	7.03	31.53	0.55	1.17
47	Tlemcen Zenata	35.01	1.46	4.05	34.24	0.32	1.27
48	Touggourt	6.13	33.12	25.44	21.9	2	0.81

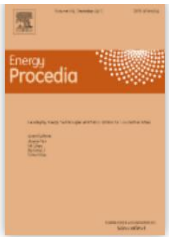
Annexe chapitre 6.

Tableau 6.a. Questionnaire utilisé pour réalisé notre profil de charge.

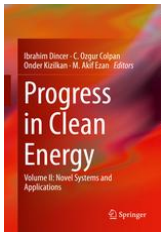
Temps de fonctionnement (h) / Appareil	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
Lampe					x	x	x										x	x	x	x	x	x	x	x
Réfrigérateur	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
Congélateur	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
Téléviseur										x	x	x	x			x	x	x	x	x	x	x	x	x
Ordinateur																x	x	x	x	x	x	x	x	x
Four																	x							
Cuisinière							x			x	x						x	x	x	x				
Fer à repasser									x															
Lave linge									x	x														
Robot											x													

Annexe 7 : Liste des publications scientifiques

7. a. Liste des publications internationales

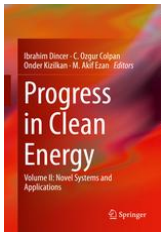


Ghedamsi R, Settou N, Saifi N, Dokkar B, 2014. Contribution on buildings design with low consumption of energy incorporated PCMs, ***Energy Procedia,*** 50:322-332.



Ghedamsi R, Settou N, Saifi N, Rahmouni S, Dokkar B, Recioui B, 2015. Numerical simulation of wallboards constructive incorporated with different PCMs content solutions for passive cooling in southern of Algeria. ***Springer International Publishing Switzerland***, I. Dincer et al. (eds.), Progress in Clean Energy, Volume 2: Novel Systems and Applications, Pages 195-208.

Ghedamsi R, Settou N, Gouareh A, Khamouli A, Saifi N, Recioui B, 2015. Estimating the energy consumption in building sector in Algeria using bottom-up model. ***IEEE publication***, DOI: 10.1109/IREC.2015.7110942.



Rahmouni S, Settou N, Negrou B, Chennouf N, and **Ghedamsi R**. Prospects and Analysis of Hydrogen Production from Renewable Electricity Sources in Algeria. 2015. ***Springer International Publishing Switzerland***, I. Dincer et al. (eds.), Progress in Clean Energy, Volume 2, Pages 583-602.

Ghedamsi R, Settou N, Gouareh A, Khamouli A , Saifia N, Recioui B, Dokkar B, Modeling and forecasting energy consumption for residential buildings in Algeria using bottom-up approach. 2016. ***Energy and Buildings,*** 121:309-317.

Recioui B, Settou N, Khalfi A, Gouareh A, Rahmouni S, **Ghedamsi R,** 2016. Valorization of carbon dioxide by conversion into fuel using renewable energy in Algeria. ***Transportation Research Part D***, 43:145-157.

7. b. Lise des communications

Ghedamsi R, Settou N, Recioui B, 2015. Effects of PCM on the thermal performance of building walls with different structure materials in Ouargla. ***Journée d'étude sur la Lumière, l'Energie et le Développement Durable***, Ouargla.

Ghedamsi R, Settou N, Gouareh A, Khamouli A, Saifi N, Recioui B, 2015. ***The 6th International Renewable Energy Congress (IREC),*** Souse, Tunisia.

Ghedamsi R, Settou N, Saifi N, Dokkar B, 2014. Contribution on buildings design with low consumption of energy incorporated PCMs, ***TMREES14 international conference on technologies and materials for renewable energy, environment and sustainability***, Beirut, Lebanon.

Ghedamsi R, Settou N, Gouareh A, Khamouli A, Saifi N, Recioui B, 2014. Numerical simulation of wallboards constructive incorporated with different PCMs content solutions for passive cooling in southern of Algeria, ***International Conference on Clean Energy***, Istanbul,Turkey.

Développement d'une méthodologie de conception de bâtiments à énergie positive en Algérie

Résumé: Le secteur du bâtiment en Algérie consomme prés de 43% de l'énergie finale et émet 25 % de CO_2. Il s'avère donc nécessaire de réduire l'impact environnemental de ce secteur en promouvant le concept des bâtiments à basse consommation d'énergie et ensuite la conception des bâtiments à énergie positive. L'intégration des sources d'énergies renouvelables au bâtiment constitue une solution respectueuse de l'environnement. Elles permettent d'acquérir une certaine autonomie énergétique et de réaliser des économies à moyen et long terme. Dans cette thèse, nous développons une méthodologie pour réaliser des études de conception de bâtiments à énergie positive. La méthodologie consiste à déterminer des modèles architecturaux pour l'amélioration des performances énergétique et du confort thermique des bâtiments ainsi que la réduction des émissions de CO_2 dans l'environnement. Un modèle bottom-up a été utilisé pour la modélisation et la prévision de la consommation d'énergie en bâtiments résidentiels Algérien jusqu'en 2040 pour faire face aux défis énergétiques du futur. Cette étude est basée sur le Système d'Information Géographique (SIG).

Mots-clés: Conception architecturale, Impact environnemental, bâtiments à énergie positive, Etude prospective, SIG.

Development of a Net Zero Energy Building concept methodology in Algeria

Abstract: In Algeria, the building sector consumes the most part of energy, namely 43% and emits about 25% of CO_2. It is therefore necessary to reduce the environmental impact of this sector by promoting the concept of low-energy buildings, then the concept of a Net Zero Energy Building. The integration of renewable energy sources in the building is an environmentally friendly solution. It allows to acquire a certain degree of energy autonomy and to achieve energy savings in the medium and long term. Therefore, we suggest developing a design for buildings with energy recovery that can adapt to its environment. In this work, a bottom-up model has been used in modeling and forecasting of energy consumption for Algeria residential buildings until 2040 to meet the energy challenges of the future. This study based on the Geographic Information System (GIS) technique. Furthermore, we develop a methodology to implement studies for positive energy building design. The methodology consists to determine architectural models for improving energy performance and thermal comfort of buildings as well as reducing CO_2 emissions.

Keywords: Architectural design, Environmental impact, Net Zero Energy Building, Prospective study, GIS.

تطوير منهجية تصميم مباني الطاقة الإيجابية في الجزائر

ملخص: يستهلك قطاع البناء في الجزائر حوالي 43٪ من الطاقة النهائية و ينتج من ذلك 25٪ من ثاني أكسيد الكربون. لذلك من الضروري الحد من التأثير البيئي لهذا القطاع من خلال تعزيز مفهوم المباني المنخفضة الطاقة ومن ثم تصميم مباني الطاقة الإيجابية. يعتبر دمج مصادر الطاقة المتجددة في المبنى حلاً يحترم البيئة. فهي تجعل من الممكن الحصول على استقلالية معينة في مجال الطاقة وتحقيق مدخرات على المدى المتوسط والطويل. في هذه الأطروحة، نقوم بتطوير منهجية لإجراء دراسات التصميم لمباني الطاقة الإيجابية. تتكون المنهجية في تحديد النماذج المعمارية لتحسين أداء الطاقة والراحة الحرارية للمباني وكذلك تقليل انبعاث ثاني أكسيد الكربون تم استخدام نموذج من أسفل إلى أعلى للتنبؤ بكميات الطاقة المستهلكة في المباني السكنية الجزائرية حتى أفاق 2040 لمواجهة تحديات الطاقة في المستقبل. هذه الدراسة مبنية على نظام المعلومات الجغرافية (GIS).

كلمات مفتاحية: التصميم المعماري ، التأثير البيئي، الطاقة الإيجابية، الدراسة المستقبلية، نظام المعلومات الجغرافية.