

UNIVERSITE CONSTANTINE 3 - SALAH BOUBNIDER

Faculté d'Architecture et d'Urbanisme

Département d'Architecture



EVALUATION DE LA PERFORMANCE ENERGETIQUE DU LOGEMENT
COLLECTIF DANS LES ZONES HUMIDES «CAS DE LA VILLE BEJAIA ALGERIE»

THESE

Présentée pour l'Obtention du Diplôme de
Doctorat LMD
En Architecture & Environnement Bâti

Option
Ville & Environnement Durable.

Par

KADI Yasmina.

Année Universitaire

2023/2024.

UNIVERSITE CONSTANTINE 3 - SALAH BOUBNIDER

Faculté d'Architecture et d'Urbanisme

Département d'Architecture



N° de Série :

N° d'Ordre

EVALUATION DE LA PERFORMANCE ENERGETIQUE DU LOGEMENT

COLLECTIF DANS LES ZONES HUMIDES

« CAS DE LA VILLE BEJAIA ALGERIE »

THESE

Présentée pour l'Obtention du Diplôme de
Doctorat LMD
En Architecture & Environnement Bâti

Par

KADI Yasmina

Devant le Jury Composé de :

Pr. DERRADJI Mohamed	Président	Université Constantine 3.
Pr. KORICHI Ammar	Directeur de thèse	Université Constantine 3.
Pr. LOUAFI Samira	Examinatrice	Université Constantine 3.
Dr. DAKHIA Azzedine	Examineur	Université de Biskra.
Dr. CHERAITIA Mohamed	Examineur	Université de Guelma.
Pr. REHAILIA Hassib	Examineur	Université d'Annaba.

REMERCIEMENTS

Je remercie le Bon Dieu de nous avoir donné la force et la connaissance pour accomplir un travail qu'il aime.

Je tiens à remercier Pr. Ammar KORICHI Professeur à l'Université Salah Boubnider Constantine 3, qui m'a encadré tout au long de cette thèse et qui m'a fait partager ses brillantes intuitions. Qu'il soit aussi remercié pour sa gentillesse, sa disponibilité permanente et pour les nombreux encouragements qu'il m'a prodigués.

Je remercie Pr. ROUAG Djamila, directrice du laboratoire Énergie et Environnement. C'est à ses côtés que j'ai compris ce que rigueur et précision voulaient dire.

Je tiens à exprimer ma profonde gratitude au Dr. SOTEHI Oualid. Sa générosité inégalée, sa disponibilité, son temps précieux, et son immense savoir ont été des atouts cruciaux dans la réalisation de ce travail académique. L'assistance dévouée du Docteur a été une source d'inspiration constante, et je suis reconnaissante de bénéficier de sa guidance éclairée.

Je tiens aussi à remercier Dr. CHADI Maalouf Maître de conférences à L'université Champagne Ardenne Reims en France pour son accueil chaleureux et sa générosité inestimable lors de mon séjour scientifique au laboratoire GRESPI. Ses conseils éclairés, son soutien constant, et son expertise ont été des éléments déterminants pour la réussite de notre article scientifique et mon parcours académique.

J'adresse tous mes remerciements à Madame LOUAFI Samira, Professeur de l'Université Salah Boubnider Constantine 3, m'a non seulement initié à la Recherche dans l'architecture bioclimatique lorsque j'étais de ses élèves, mais elle m'a aussi prodigué de nombreux conseils pour bien débiter le troisième cycle universitaire dont cette thèse est l'accomplissement. Qu'elle en soit remerciée.

Enfin, je tiens à remercier tous les membres du Laboratoire qui ont répondu avec calme et patience aux questions quotidiennes dont je les accablais.

Un grand merci aussi à tous les membres de la faculté d'architecture et Urbanisme et en particulier à Pr MAHIMOUD Aissa.

DEDICACES

À mes chers parents, dont la détermination inflexible et les sacrifices incommensurables ont tracé la voie de l'éducation et du succès. Votre combat acharné dans la vie a forgé la personne que je suis aujourd'hui. À ma mère, qui a combattu les vents contraires pour nous offrir un avenir meilleur, et à mon père, dont l'amour inconditionnel a été mon rocher. Cette thèse est le fruit de vos efforts et de vos enseignements précieux. Merci pour votre soutien indéfectible et votre influence inestimable.

À toute ma famille, pilier solide de mon existence, je dédie cette thèse avec une profonde reconnaissance.

Un sincère merci à mes sœurs bien-aimées, pour leur soutien indéfectible et leur amour inconditionnel. Leurs encouragements constants ont été une source d'inspiration tout au long de ce périple académique. Leur présence joyeuse et leurs mots bienveillants ont allégé les moments difficiles et ont ajouté une touche spéciale à cette aventure. Merci pour votre soutien et votre amour, qui ont enrichi chaque étape de ce parcours.

À mon mari pour sa patience, son encouragement constant, et sa présence réconfortante tout au long de cette aventure académique. À mon fils qui a apporté une joie indescriptible à chaque étape de ce parcours. Votre soutien inconditionnel a été la force motrice derrière la réalisation de cette thèse. Merci pour votre amour, votre compréhension et vos sacrifices. Cette réalisation est autant la vôtre que la mienne.

À tous mes amis proches, qui ont partagé ce périple avec moi, je tiens à exprimer ma sincère gratitude. Votre compagnie, vos encouragements et votre soutien ont allégé les charges de ce parcours académique. Chacun de vous a contribué à rendre cette aventure plus significative et mémorable. Merci de tout cœur pour votre amitié, qui a été une source de réconfort et de joie tout au long de cette expérience.

TABLE DES MATIERES

EVALUATION DE LA PERFORMANCE ENERGETIQUE DU LOGEMENT COLLECTIF DANS LES ZONES HUMIDES.....	I
Remerciements	III
DEDICACES	IV
TABLE DES MATIERES	V
LISTE DES FIGURES :	XII
LISTE DES TABLEAUX	XVI
Résume :.....	XVII
CHAPITRE I : INTRODUCTION GENERALE	2
1.1 La question de recherche principale :.....	5
1. 2 Questions de recherche secondaires :.....	5
1.3 Les hypothèses de recherches :	5
1.4 Les objectifs de recherche :	6
1.5 La Méthodologie de Recherche :	6
1.6 Structure de la thèse :.....	7
CHAPITRE II : Generalites sur L’EFFICACITE ENERGETIQUE Dans le batiment.....	10
Introduction	11
2.1 Le vocabulaire du développement durable et la construction durable :.....	11
2.1.1 La durabilité dans le cadre bâti :	12
2.2 Le bâtiment et le défi du carbone :.....	13
2.2.1 Approches de réduction des émissions de carbone :.....	14
2.2.2 Bâtiment à zéro carbone « ZCB » et Bâtiment à zéro énergie « ZEB » :	15
a) Bâtiment à zéro énergie « ZEB » :.....	15
b) Bâtiment à zéro Carbone «ZCB» :	16
2.3 Le bâtiment à haute performance :.....	17
2.3.1 Le Concept De L’efficacité Énergétique Dans Le Bâtiment :	19
2.3.2 Les stratégies passives de l’efficacité énergétique :	20
2.3.2 Les stratégies d’efficacité énergétique actives :	11
a) Les systèmes actifs :.....	11
b) Les systèmes hybrides :.....	11
c) Les techniques de refroidissement actives :.....	11
d) Les ventilateurs :.....	11
e) Les refroidisseurs par évaporation :	12
f) Les pompes à chaleur :.....	12
2.3.3 Le comportement des utilisateurs :	13
2.4 Les Approches du bâtiment à basse consommation énergétique :.....	14

2.4.1 Les opérations internationales du bâtiment à basse consommation d'énergie :.....	15
a) Les approches purement énergétiques des bâtiments performants :	15
❖ Passivhaus (Allemagne) :	15
❖ MINERGIE® (EN SUISSE) :	17
❖ LES EXIGENCES REGLEMENTAIRES FRANÇAISES POUR LA CONSTRUCTION DES BATIMENTS :	18
❖ Maisons Zéro Énergie :	23
b) Les approches plus larges pour l'évaluation de la performance des bâtiments :	24
❖ Le label BREEAM (Building Research Establishment's Environmental Assessment Method):	25
❖ Le label LEED "Leadership in Energy and Environmental Design" (ÉTATS-UNIS):	25
❖ Le label CASBEE «Comprehensive Assessment System for Building Environmental Efficiency" (JAPON):	26
Conclusion :	29
CHAPITRE III : LE CONFORT THERMIQUE EN CLIMAT TEMPERE MEDITERRANEEN	30
Introduction	31
3.1 Le climat et les conditions climatiques :	31
3.1.1 Les paramètre du climat :	31
a) L'ensoleillement :	31
b) Température :	34
c) L'humidité relative ou l'hydrothermie :	34
d) Les précipitations :	35
e) Le vent :	36
3.2 Les types du climat sur terre :	37
3.2.1 Le climat Méditerranéen :	38
a) Caractéristiques du climat Méditerranéen :	38
b) Délimitation du climat Méditerranéen :	39
c) Situation bioclimatique d'une ville méditerranéenne :	40
3.3 La classification climatique Algérienne :	42
3.3.1 Les zones climatiques d'hiver :	43
3.3.2 Les zones climatiques d'été : Cinq zones déterminent les zones climatiques d'été..	43
3.4 Le confort thermique et les approches d'évaluation :	44
3.4.1 Le modèle de Fanger	45
3.4.2 Le modèle adaptatif	45
3.4.3 Application du model Adaptatif dans les bâtiments naturellement ventilés	46
3.4.4 Exemples sur l'application de l'approche Adaptatif dans les conditions méditerranéennes :	47
3.5 Le confort thermique à travers l'architecture traditionnelle et vernaculaire.	48
3.6 L'architecture vernaculaire en climat tempéré chaud méditerranéen :	52

Conclusion :	57
CHAPITRE IV : ETAT DE L'ART DES BATIMENTS NZEB_NEARLY ZERO ENERGY BUILDINGS ...	58
Introduction	59
4.1 Les stratégies de performance énergétique dans les projets NZEB	60
4.2 Optimisation de l'isolation thermique.....	63
4.2.1 L'isolation thermique écologique à faible impact environnemental	63
4.2.2 Les isolants thermiques à base de fibre du bois :	65
4.2.3 Recommandations pour l'isolation thermique	66
4.3 Optimisation des ouvertures	67
4.3.1 Les facteurs caractérisant les échanges thermiques au travers d'un vitrage :	68
a) Le coefficient de transmission thermique U	68
b) Le facteur solaire g ou (FS).....	69
4.3.2 Propriétés des vitrages par rapport au transfert d'énergie	69
a) La réflectivité et vitrages réfléchissants.....	69
b) Émissivité et vitrages à basse émissivité.....	70
c) Transmissivité	70
4.3.3 Réduction de la valeur U : Le vitrage multiple	72
a) Le Double et Triple vitrage.....	72
4.3.4 Installation de films à contrôle solaire SCF (solar control film):.....	72
a) Vitrages réfléchissants	73
b) Vitrage à basse émissivité et le verre spectralement sélectif.....	73
4.3.5 État des recherches sur l'optimisation du vitrage :.....	75
a) Les Vitrages intelligents dynamiques :.....	75
b) Le vitrage Electrochrome adaptatif (ECW) :	76
c) Vitrage Thermochromique :.....	78
d) La performance énergétique des films de contrôle solaire :.....	80
e) La production d'énergie sur le vitrage ou sur les dispositions d'ombrage :.....	81
f) L'influence des films en climat méditerranéen :.....	82
4.3.6 Optimiser la performance des fenêtres et protection solaire en climat méditerranéen le cas Algérien :	84
4.3.7 Recommandations pour améliorer les fenêtres :.....	85
4.4 Systèmes énergétiques intégrés au NZEB dans le contexte méditerranéen	85
CONCLUSION :	91
CHAPITRE V : Analyse du contexte Climatique ENERGETIQUE, ENVIRONNEMENTAL de la ville de BEJAIA. 93	
Introduction	94
5.1 La problématique de l'habitat :.....	94
5.1.1 La Crise du logement et les facteurs d'influence	95

5.1.2 Les facteurs d'influence :.....	96
5.2 Le contexte énergétique du bâtiment résidentiel :	96
5.2.1 La consommation d'énergie :.....	96
5.2.2 La consommation énergétique dans le secteur résidentiel :	99
5.3 La qualité environnementale du Bâtiment :	100
5.4 Les parties prenantes principales et la stratégie nationale de la maîtrise d'énergie : ..	102
5.4.1 Réglementation Thermique Algérienne :	103
5.4.2 La stratégie nationale de la maîtrise d'énergie	104
5.4.3 Le Programme National de Maîtrise de l'Énergie (PNME) :	104
5.4.4 Le Fonds National pour la Maîtrise de l'Énergie (FNME) :	105
5.4.5 Le Comité Intersectoriel de La Maîtrise de l'Énergie (CIME) :.....	105
5.4.6 L'Agence Nationale pour la Promotion et la Rationalisation de l'Utilisation de l'Énergie (APRUE) :	105
a) Programme Eco-Bat :	106
b) Programme triennal d'efficacité énergétique «2011-2013» :.....	106
c) Nouveau programme national sur l'efficacité énergétique (2016-2030).....	107
❖ La coopération internationale :	107
❖ Le projet CES- MED :.....	107
❖ Le projet Med-Eneec :.....	109
❖ Le projet Med-Eneec II :.....	109
5.5 Présentation de Bejaia :	110
5.5.1 Les caractéristiques climatiques :.....	111
a) Température de l'air :	111
b) Humidité Relative :.....	111
c) Vitesse des vents :.....	113
d) La Durée d'Ensoleillement :	113
5.6 L'analyse bioclimatique la ville de Bejaia :	114
5.6.1 Application de l'approche bioclimatique :	115
a) Le diagramme de GIVONI et MILNE :.....	115
b) Application de la méthode de Mahoney :	117
5.6.2 Recommandation pour l'insertion du bâtiment en climat tempéré chaud méditerranéen :.....	119
Conclusion :	121
CHAPITRE VI : EXPLORATION DES cas D'ETUDE	122
Introduction	123
6.1 Investigation du logement social collectif à Bejaia	123
6.1.1 Description Du Cas d'étude :.....	124
a- Présentation du bâtiment :.....	124

b- Caractéristiques de l'enveloppe :	126
c- Les parois opaques : Les caractéristiques thermo-physiques des parois sont représentées sur le tableau 6.1.	126
d- Les parois vitrées :	127
e- Protection solaire :	127
f- Perméabilité à l'air :	127
g- Les scénarios d'occupation :	128
h- Caractéristiques des usages :	129
i- Le système du chauffage :	129
6.1.2 Vérification de la conformité du bâtiment vis-à-vis la Règlementation thermique Algérienne :	130
a) Création et introduction des données du projet :	131
b) Conformité DTR :	131
c) Synthèse des échanges thermiques en hiver :	132
d) Synthèse des échanges thermiques en été :	132
6.1.3 Enquête au porte à porte :	133
a) Le questionnaire :	134
b) Analyse des résultats d'enquête :	135
c) Participation :	135
d) Par rapport à la typologie du logement :	135
e) Par rapport à l'orientation des logements :	136
f) Confort thermique, comportement et consommation énergétique :	137
g) Le confort thermique en hiver :	138
h) Le comportement hivernal :	139
i) Le cout du chauffage :	140
j) L'aération des appartements :	140
k) Le confort thermique en été :	141
l) Le comportement estival :	143
m) L'utilisation de la climatisation :	144
n) Le cout du rafraichissement :	145
o) L'ouverture des fenêtres :	145
p) Participation au bâtiment à haute performance énergétique (amélioration souhaités) :	146
q) Conclusion de l'enquête :	147
6.2 Investigation du cas Résidence promotionnelle	148
6.2.1 Présentation du bâtiment :	148
6.2.2 Caractéristiques des parois opaques et vitrées :	149
a) Les ouvertures extérieures :	149
b) Les parois opaques :	149

6.2.3 Le système du chauffage :	150
6.2.4 Conclusion d'enquête :	150
6.3 Étude expérimentale sur le confort thermique :	150
6.3.1 Instrumentation in situ :	151
6.3.2 Descriptions des outils de mesures :	151
a) Mesure de la température de l'air T (°C) et l'humidité relative HR (%).....	151
b) Mesure de la température surfacique Ts (°C) :	152
c) Mesure de vitesse de l'air (m/s) :	153
6.3.3 Déroulement de mesures :	154
a) Mesure en période hivernale :	154
b) Mesure en période estivale :	154
6.4 Evaluation du confort thermique utilisant le modèle adaptatif du standard ASHRAE 55 :	155
6.4.1 Résultat d'évaluation du confort durant l'été :	155
6.4.2 Résultat d'évaluation du confort en l'hiver pour les deux cas d'étude	156
a) Résultat pour la chambre :	157
6.5 Evaluation de la consommation énergétique :	158
6.5.1 La consommation énergétique du premier cas, logement social collectif.....	158
6.5.2 La consommation énergétique du deuxième cas, Résidence isolée :	160
Conclusion :	162
CHAPITRE VII : EVALUATION DES STRATEGIES DE PERFORMANCE ENERGETIQUE.....	164
Introduction	165
7.1 Modélisation et simulation :	166
7.1.1 Le model de simulation :	166
7.1.2 Calibration et validation du model.....	167
7.2 Comparaison entre l'expérimental et la simulation	168
7.3 ETUDE de l'impact des stratégies passives	173
7.3.1 L'influence sur le confort thermique.....	173
a) L'impact de l'isolant écologique	174
b) L'influence du type de vitrage :	176
c) L'optimisation et amélioration en été	177
d) Le potentiel du confort thermique cumulé annuel	178
7.3.2 L'impact des stratégies sur la performance énergétique.....	179
a) L'isolation thermique	179
b) L'impact du vitrage et les dispositifs d'ombrage	180
c) L'impact de la ventilation naturelle	181
7.3.3 Comparaison entre les stratégies passives :	182
CONCLUSION :	184

CONCLUSION GENERALE	185
Recommandations	190
AXES DE RECHERCHES FUTURES	192
BIBLIOGRAPHIE	193
LISTE DES ANNEXES	210
ANNEXE A : Description des symboles climatique de Koppen et définition des critères, (source : Peel, Finlayson, and McMahon 2007)	210
ANNEXES B : TABLEAUX DE MAHONEY	211
ANNEXES C : DONNEES DU DTR	217
ANNEXES D : Calcul de la température opérative t_o	219
ANNEXES E : Questionnaire d'enquête :	220
Résume :	224

LISTE DES FIGURES :

Figure 2.1 Catégorie des termes reliés au bâtiment à zéro carbone, source (W. Pan, 2014).	17
Figure 2.2 Six facteurs influent sur la consommation énergétique du bâtiment. Source (Yoshino, et al, 2017)	20
Figure 2.3 L'implantation du bâtiment en tenant compte des vents, l'ensoleillement et du relief. Source : (Liebard, 2005)	21
Figure 2.4 Les ponts thermique et le risque de condensation dans un détail de raccord de toiture, (source : Liébard, 2005).	22
Figure 2.5 Schématisation des principes de la conception d'une maison passive (Passivhaus, 2015).	17
Figure 2.6 Les principes du bâtiment Minergie® (Minergie, 2018).	18
Figure 2.7 Quelques principes importants de conception permettant de répondre à l'exigence du Bbio. Source (Ministère de l'égalité des territoires et du logement, Ministère de l'écologie, du développement durable et de l'énergie 2013).....	20
Figure 2.8 Chronologie des systèmes d'évaluation environnementale du bâtiment les plus répondu, source (Shan et al, 2018).	25
Figure 2.9 La définition de la limite spatiale pour l'évaluation CASBEE, et le diagramme BEE. Source (IBEC, 2016).....	27
Figure 2.10 Classement de l'impact du réchauffement climatique par l'évaluation des émissions de CO2 du cycle de vie avec CASBEE. Source (IBEC, 2016).	27
Figure 2.11. Structure stratifiée d'une zone définie pour l'évaluation CASBEE. Source (JSBC and IBE, 2016).	28
Figure 3. 1. Composition du rayonnement solaire. Source (Liébard, 2005).	32
Figure 3. 2. Coordonnées solaires. Source (Liébard, 2005)	32
Figure 3. 3 Le spectre solaire. (Source : Bodart ,2002).....	33
Figure 3. 4 Les modes de transfert de chaleur. (Source : Architecture et Climat, 2021). ...	34
Figure 3. 5 Ecoulement du vent de L'Anticyclone (A) vers la Dépressions (D) (Izard, 1979).....	37
Figure 3. 6 Variation de la vitesse du vent selon la rugosité du site. (CHATELET ,1998 ; Liébard, 2005)	37
Figure 3. 7 La carte mondiale de la classification climatique Köppen-Geiger. Source (Peel, 2007).....	38
Figure 3. 8 Carte géographique de la Méditerranée occidentale (Aubouin , 1980) ; simplifiée et localisation des secteurs étudiés ; R.E. : Rif externe (Nord du Maroc), T.S. : Tunisie septentrionale ; B.V. : Bassin vocontien (SE de la France).....	40
Figure 3. 9 Situation bioclimatique selon le diagramme pluvio-thermique d'Emberger (Tassin, 2012).....	41
Figure 3. 10. Zone climatique en Algérie. (Source : Mokhtari, 2008).	42
Figure 3.11 La maison noire (blackhouse) à Arnol sur l'île Lewis. http://www.britainexpress.com/attractions.htm?attraction=1267	50
Figure 3.12 La maison troglodytique d'Andalousie à Guadix.	50
Figure 3.13 Tour à vent «Badgir », Iran. (Firbal, 2012).....	51
Figure 3. 14 Plans et profils courants des borries de Provence. (source : Galy, 1970).	53
Figure 3. 15 Une ferme à trulli avec plan et élévation, dans le terroir d'Alberobello dans les années 1970. (Source : Luigi, 1978).	54
Figure 3. 16 Mas traditionnel provençale. Source (Team, 2016).	55
Figure 3. 17 La division des espaces intérieurs. Source (Abouda ,1985).....	56
Figure 4. 1 Projets NZEB: a. Lime house (2011), b.Solcer house (2015). (Source: Coma , 2020).....	61

Figure 4 2 La façade principale du "Chifley Passive House". (Source (Truong , 2017).....	62
Figure 4 3 Echantillons d'enduit chanvre chaux (a), Echantillons de béton de chanvre (b). (Collet-Foucault 2004)	64
Figure 4 4 L' isolant thermique fibre de bois. Source : (Bien Isoler Ma Maison. 2023)	66
Figure 4 5 Le Facteur solaire d'un vitrage. (Source : Bodart, 2002).....	69
Figure 4 6 Evolution du pourcentage du rayonnement solaire réfléchi et transmis en fonction de l'angle d'incidence (Source : Bodart, 2002).....	70
Figure 4 7 Transmission spectrale idéale pour deux vitrages en différents climat (Source : Bodart, 2002).....	71
Figure 4 8 Principe du double et triple vitrage (Source : Blossom, 2016)	72
Figure 4 9 Principe d'un vitrage à basse émissivité sélectif (Source : Bodart, 2002).	73
Figure 4 10 La position favorable de la couche basse émissivité pour un climat chaud (Source : Bodart, 2002).	74
Figure 4 11 Du simple vitrage au vitrage plus efficace en énergie, (Source : Ye, 2013)....	75
Figure 4 12 Exemple d'un vitrage électrochrome commercialisé (Tällberg, 2019).....	77
Figure 4 13 Principe de fonctionnement d'un vitrage électrochrome. (Source : Casini, 2018).....	77
Figure 4 14 Comportement d'un revêtement thermochromique VO2. (Source : Kiri, 2013)	79
Figure 4 15 Exemple d'un vitrage thermochromique (Tällberg, 2019).....	79
Figure 4 16 L'impact de l'installation de films SCF; source (Teixeira, 2020).	83
Figure 4 17 Vues sur la maison passive nZEB. (Source : Causone, 2019)	86
Figure 4 18 Schéma général du système HVAC BNZEB, source (Ascione, 2020).....	87
Figure 4 19 Vues sur la villa Magri le vas d'étude du travail (Stasi, 2020).....	88
Figure 4 20 Schéma d'installation des systèmes : 1) Pompe à chaleur air-eau, 2) Unité extérieure de la pompe à chaleur, 3) réservoir de stockage ECS, 4) réservoir de stockage inertiel, 5) Unité de climatisation, 6) Échangeur de chaleur Terre-air. Source : (Stasi, 2020).....	89
Figure 4 21 Unité de traitement d'air combinée à l'échangeur de chaleur. Source (Stasi, 2020).....	90
Figure 5. 1 Structure de la consommation finale par produit. Source (MEA, 5051)	97
Figure 5. 2.Structure de la consommation finale par secteur d'activité. Source : (MEA, 5051).....	98
Figure 5. 3. Répartition de la consommation du secteur résidentiel par type d'énergie. (APRUE- Edition 2017).	99
Figure 5. 4. Répartition de la consommation du secteur résidentiel par type de logement. (APRUE- Edition 2017).	100
Figure 5. 5. Bilan des émissions de GES par secteur, an 2015 en Teq CO2 (APRUE, 2017)	101
Figure 5. 6. Dispositifs nationale de la maîtrise de l'énergie. (APRUE, 2011).	104
Figure 5.7 Situation géographique de la ville de Bejaia (source : Google earth).....	110
Figure 5. 8 . Evolution des températures de l'air à Bejaia (source l'auteur).	111
Figure 5.9. Les valeurs d'humidité relative à Bejaia (source l'auteur).	112
Figure 5.10 Les valeurs d'humidité relative et température de l'air à Bejaia	112
Figure 5.11 Pluviométrie à Bejaia (source l'auteur).....	113
Figure 5.12 la vitesse des vents dominant à Bejaia (source l'auteur).	113
Figure 5.13. Durée d'enseillement à Bejaia (source l'auteur).....	114
Figure 5.14 Diagramme psychométrique applique sur la ville de Bejaia. (Source : l'auteur avec Climate consultant).	116
Figure 6. 1 Situation du bâtiment d'étude. (Source : Google Earth).....	124

Figure 6. 2 Le premier bâtiment d'étude. (Photographie prise le 25 décembre 2018, source : l'auteur).	124
Figure 6. 3 Plan de masse du logement social collectif. (Source, l'auteur).	125
Figure 6. 4 Vue en plan sur l'étage courant du bâtiment (l'auteur, à partir des documents graphiques d'OPGI Bejaia).	126
Figure 6. 5 Scénario d'occupation du logement. (Source : L'auteur)	129
.....	129
Figure 6. 6 Page d'accueil de RETA (Source : http://reta.cder.dz/interact/#/).	130
Figure 6. 7 Ecran du projet crée avec ces caractéristiques (Source : l'auteur).	131
Figure 6. 8 Vérification réglementaire par RETA (Source : l'auteur).	132
Figure 6. 9 Nombre de participant en pourcentage pour les logements du bâtiment d'étude (Source : l'auteur).	135
Figure 6. 10 Répartition en pourcentage du type d'appartement des participants. (Source : l'auteur)	136
Figure 6. 11 Répartition en pourcentage de l'orientation des appartements de participants. (Source : l'auteur).	136
Figure 6.12 Répartition du Confort/Inconfort en fonction des logements et leurs l'orientation. (Source : l'auteur).	137
Figure 6.13 Répartition de la qualité du climat intérieur en fonction des logements. (Source : l'auteur).	138
Figure 6.14 Répartition de la sensation du froid en fonction des logements et leur orientation. (Source : l'auteur).	138
Figure 6.15 Répartition de la sensation du froid et du chaud dans les pièces en fonction des logements et leur orientation. (Source : l'auteur).	139
Figure 6.16 Répartition des réponses sur l'utilisation du chauffage. (Source : l'auteur).	140
Figure 6.17 Répartition des réponses sur le cout du chauffage. (Source : l'auteur).	140
Figure 6.18 Pourcentage des habitants (a)ouvrant les fenêtres pour aérer l'appartement et (b) fermant les volets la nuit. (Source : l'auteur).	141
Figure 6.19 . Répartition de sensation de la chaleur en fonction des logements et leur orientation. (Source : l'auteur).	142
Figure 6.20 Répartition de la sensation de chaleur en été dans les pièces en fonction des logements et leur orientation. (Source : l'auteur).	143
Figure 6.21 Répartition des réponses sur la possession d'un (a) climatiseur et (b) d'un ventilateur en fonction des logements et leur orientation. (Source : l'auteur).	144
Figure 6.22 Répartition des réponses sur l'utilisation du climatiseur en fonction des logements et leur orientation. (Source : l'auteur).	145
Figure 6.23 Répartition de réponses sur le cout du rafraichissement. (Source : l'auteur).	145
.....	145
Figure 6.24 Répartition de réponses sur l'ouverture des fenêtres. (Source : l'auteur).	146
Figure 6.25 Répartition des réponses à la question « Quel type d'amélioration vous parait le plus envisageable ? ». (Source : l'auteur).	147
Figure 6.26 Résidence promotionnelle. (Source : l'auteur ; Photographie prise Décembre 2019).	148
Figure 6.27 Plan de l'appartement d'étude. (Source : l'auteur).	148
Figure 6.28 L'enregistreur de données de température et d'humidité. (Source du Laboratoire EE)	152
Figure 6.29 Thermomètre Infrarouge. (Source du Laboratoire EE).	153
Figure 6.30 Anémomètre thermique TA 300. (Source du Laboratoire EE)	154
Figure 6.31 Évolution de la température de l'air et du confort thermique en été au niveau de toutes les pièces du bâtiment sans isolation, utilisant le standard Ashrae_55.	155

Figure 6.33 L'évolution de la température de l'air et le confort thermique dans les chambres en hiver selon le l'équation du confort adaptatif du standard Ashrae_55.....	158
Figure 6.34 Consommation énergétique du gaz et d'électricité annuelle, selon les factures SONELGAZ.	160
Figure 6.35 Consommation énergétique du gaz et d'électricité annuelle, selon les factures SONELGAZ.	161
Figure 6.36 Comparaison de la consommation énergétique entre les deux cas d'étude. ..	162
Figure 7. 1 Comparaison entre la température de l'air intérieur mesuré et simulé durant la période d'étude. (a)Juillet 27-30,2019 ;(b) Janvier 11-14,2019. (Source, l'auteur).....	168
Figure 7. 2 L'évolution de la température et le confort thermique pour le Séjour en hiver. (Source, l'auteur).	169
Figure 7. 3 L'évolution de la température et le confort thermique pour la Chambre 1 en hiver (Source, l'auteur).....	170
Figure 7. 4 . L'évolution de la température et le confort thermique pour la Chambre 2 en hiver (Source, l'auteur).....	171
Figure 7. 5 L'évolution de la température de l'air et le confort du Séjour en été (Source, l'auteur)	171
Figure 7. 6 L'évolution de la température de l'air et le confort thermique de la chambre 2 en été (Source l'auteur).....	172
Figure 7. 7 L'évolution de la température de l'air et le confort thermique de la chambre 1 en été. (Source, l'auteur).....	172
Figure 7. 8 La composition des différentes solutions étudiées du mur vertical. (Source, l'auteur).	173
Figure 7. 9 L'influence des parois isolées sur la température de l'air intérieur en hiver. (Source, l'auteur).	175
Figure 7. 10 La température de l'air intérieur en été avec les différents types d'isolation. (Source, l'auteur).	176
Figure 7. 11 L'influence du double vitrage et l'isolation thermique sur la température de l'air intérieur en hiver. (Source, l'auteur).	177
Figure 7. 12 L'influence de l'optimisation sur la température de l'air intérieur en été. (Source, l'auteur).	178
Figure 7. 13 Comparaison entre le potentiel du confort cumulé annuel et les heures d'inconfort annuelles. (Source, l'auteur).	179
Figure 7. 14 Résultat sur les besoins énergétique du chauffage et climatisation après l'isolation thermique de l'enveloppe. (Source, l'auteur).	180
Figure 7. 15 . La consommation énergétique du bâtiment doté du double vitrage et dispositifs d'ombrage. (Source, l'auteur).	181
Figure 7. 16 Comparaison entre la consommation énergétique du bâtiment avec la ventilation naturelle et le scénario du bâtiment de référence.	181
Figure 7. 17 Comparaison de la consommation énergétique entre tous les paramètres d'étude. (Source, l'auteur).	182
Figure 7. 18 Comparaison de la demande énergétique du bâtiment de référence et le cas optimisé. (Source, l'auteur).	183

LISTE DES TABLEAUX

Table 2. 1 Concepts reliés au ZEB et ZCB (Hui, 2010).....	16
Table 2. 2 les critères du label Passivhaus :	16
Table 6. 1. Caractéristiques thermo-physiques des parois opaques (Derradji, 2017 ; Imessad, 2014).....	126
Table 6. 2 Composition de parois vitrées :	127
Table 6. 3 Vérification réglementaire d'été DTR. C-3.4.....	132
Table 6. 4 Vérification réglementaire d'été DTR. C-3.4.....	133
Table 6. 5 Coefficient K (en W/m ² °C) des ouvertures (DTR C3.2, voir Annexe C).	149
Table 6. 6 Caractéristiques thermo-physiques des parois opaques	149
Table 6. 7 . La consommation d'Électricité et du Gaz du bâtiment conventionnel selon les factures SONELGAZ durant quatre trimestres.	159
Table 6. 8 La consommation d'Électricité et du Gaz de la résidence isolée selon les factures SONELGAZ durant trimètres.	160
Table 7. 1 Critères de calibration de validation du modèle de simulation. (Source, l'auteur).	167
Table 7. 2 Propriété thermique des murs proposés pour l'étude. (Source, l'auteur).	174

Résumé :

Dans le cadre de la transition énergétique et le défis environnemental mondial, l'amélioration de la performance énergétique des bâtiments est devenue un aspect impératif en architecture et dans l'ingénierie de la construction afin de s'engager aux objectifs du développement durable des bâtiments.

Cette thèse s'attache à étudier la performance énergétique et le confort thermique des bâtiments résidentiels dans un climat tempéré chaud méditerranéen, en mettant particulièrement l'accent sur la ville de Béjaïa, en Algérie. Elle examine également le degré d'intégration de la réglementation nationale et des normes internationales relatives à la performance énergétique et au confort thermique.

Cette étude a permis de fournir un aperçu clair et explicite de la performance des bâtiments NZEB et des projets pilotes réalisés, conçus comme des laboratoires vivants et des modèles référentiels du bâtiment à Énergie Presque Nulle (NZEB) en climat tempéré méditerranéen. L'analyse de ces bâtiments a offert des connaissances concrètes sur les stratégies de haute performance énergétique les plus déterminantes dans le même contexte d'étude, ainsi que sur leur comportement tout au long de la durée de vie des bâtiments.

Ce travail de recherche vise à évaluer la performance énergétique et le confort thermique des bâtiments, à travers une série d'analyses. Tout d'abord, une analyse climatique détaillée de la région de Bejaia a été réalisée, permettant de comprendre les spécificités climatiques locales et d'adapter les stratégies de conception des bâtiments en conséquence. Cette analyse a été complétée par des simulations numériques à l'aide du logiciel TRNSYS, permettant de prédire la consommation énergétique des bâtiments et d'évaluer l'impact de différentes stratégies de conception.

Parallèlement, des enquêtes en porte-à-porte ont été menées auprès des résidents pour évaluer leur perception du confort thermique et recueillir des données sur les pratiques de chauffage et de refroidissement, ces données ont été intégrées dans le model de simulation numérique. En outre, des études de cas ont été réalisées sur différents types de bâtiments résidentiels, notamment un logement social conventionnel et une résidence promotionnelle dotée d'une isolation renforcée. Cette approche comparative a permis de mettre en évidence les avantages de l'isolation thermique dans l'amélioration du confort thermique des bâtiments.

Les résultats obtenus indiquent que la configuration des parois isolées avec des fibres de bois a un impact positif tant en été qu'en hiver, conduisant à des plages de température intérieure confortables. Les dispositifs d'ombrage et le choix du vitrage se révèlent ainsi d'être les stratégies les plus efficaces. Les résultats confirment que le bâtiment optimisé permet une économie d'énergie d'environ 90 % pour le chauffage et 55 % pour le refroidissement. De plus, il est possible de réduire la consommation énergétique annuelle à 3 kWh/m².a, ce qui représente une diminution de 77 % par rapport au cas conventionnel.

Mots clés : Confort thermique, évaluation de la performance énergétique, Bâtiment résidentiel, NZEB, stratégies passives, Isolation écologique, climat tempéré chaud méditerranéen,

Abstract:

In the context of the energy transition and global environmental challenges, improving the energy performance of buildings has become an imperative aspect of architecture and construction engineering to meet sustainable development goals for buildings.

This thesis aims to study the energy performance and thermal comfort of conventional residential buildings in a hot temperate Mediterranean climate, with a particular emphasis on the city of Bejaia, Algeria. The goal is to examine the extent of integration of national and international regulations and standards aimed at improving energy performance.

This study provides a clear and explicit overview of the performance of NZEB (Nearly Zero Energy Buildings) and the pilot projects completed, designed as living laboratories and reference models for NZEB buildings in a Mediterranean temperate climate. The analysis of these buildings has offered concrete insights into the most impactful high-energy-performance strategies in the same study context, as well as their behavior throughout the buildings' lifetimes.

This research aims to evaluate the energy performance and thermal comfort of buildings through a series of analyses. First, a detailed climatic analysis of the Bejaia region was conducted, helping to understand local climatic specificities and adapt building design strategies accordingly. Numerical simulations using TRNSYS software, allowing predictions of buildings' energy consumption and assessing the impact of different design strategies, supplemented this analysis.

Simultaneously, door-to-door surveys were conducted with residents to evaluate their perceptions of thermal comfort and gather data on heating and cooling practices, which were subsequently integrated into the numerical simulation model. In addition, a case study was performed on different types of residential buildings, including conventional social housing and promotional residences with enhanced insulation. This comparative approach underscored the benefits of thermal insulation in improving the overall thermal comfort of buildings. This study has provided a clear and explicit insight the energy performance and thermal comfort of buildings, while offering practical recommendations to promote sustainable and environmentally friendly construction practices.

The results indicate that the configuration of insulated walls with wood fibers has a positive impact both in summer and in winter, leading to comfortable indoor temperature ranges. Shading devices and choice of glazing emerge as the most effective strategies. The results confirm that optimized building allows for energy savings of approximately 90% for heating and 55% for cooling. Furthermore, it is possible to reduce annual energy consumption to 3 kWh/m².a, representing a 77% decrease compared to the conventional case.

Keywords: Thermal comfort, buildings energy, wood fiber ecological insulation, NZEB, Residential building energy performance evaluation.

الملخص :

في سياق التحول في مجال الطاقة والتحديات البيئية العالمية، أصبح تحسين أداء الطاقة في المباني جانباً حتمياً من جوانب الهندسة المعمارية و هندسة الإنشاءات من أجل الالتزام بأهداف التنمية المستدامة للمباني.

تبحث هذه الأطروحة في أداء الطاقة والراحة الحرارية للمباني السكنية في مناخ البحر الأبيض المتوسط المعتدل الدافئ، مع التركيز بشكل خاص في مدينة بجاية وذلك بغرض فحص مدى تكامل القوانين والمعايير الوطنية والدولية المتعلقة بالأداء الطاقوي.

قدمت هذه الدراسة لمحة واضحة وصريحة عن أداء المباني ذو استهلاك طاقة شبه معدوم NZEB والمشاريع التجريبية المنجزة و التي صُممت كمختبرات حية ونماذج مرجعية للمباني ذات الطاقة الصفرية (NZEB) في مناخ متوسطي معتدل . قدمت تحليلات هذه المباني رؤى ملموسة حول أكثر استراتيجيات الأداء الطاقوي العالي تأثيراً في نفس سياق الدراسة، وكذلك حول سلوكها على مدار عمر المباني.

تهدف هذه الدراسة إلى تقييم الأداء الطاقوي والراحة الحرارية للمباني من خلال سلسلة من التحليلات. أولاً، تم إجراء تحليل مناخي مفصل لمنطقة بجاية، مما ساعد على فهم الخصائص المناخية المحلية وتكييف استراتيجيات تصميم المباني وفقاً لذلك. وقد تم استكمال هذا التحليل بمحاكاة رقمية باستخدام برنامج TRNSYS ، مما أتاح التنبؤ باستهلاك الطاقة في المباني وتقييم تأثير استراتيجيات التصميم المختلفة.

في الوقت نفسه، تم إجراء تحقيق من باب إلى باب بين السكان لتقييم إدراكهم للراحة الحرارية وجمع البيانات حول ممارسات التدفئة والتبريد، التي تم دمجها في نموذج المحاكاة الحاسوبية. بالإضافة إلى ذلك، أجريت دراسة حالة على أنواع مختلفة من المباني السكنية، بما في ذلك المسكن الاجتماعي التقليدي والمسكن الترويحي المزود بالعازل الحراري. أتاح هذا النهج المقارن تسليط الضوء على فوائد العزل الحراري في تحسين الراحة الحرارية للمباني.

تقدم هذه الدراسة لمحة شاملة عن أداء الطاقة والراحة الحرارية للمباني، فضلاً عن تقديم توصيات عملية لتعزيز ممارسات البناء المستدامة والصديقة للبيئة. تشير النتائج إلى أن تكوين الجدران المعزولة له تأثير إيجابي في الصيف والشتاء على حد سواء، مما يؤدي إلى نطاقات درجة حرارة داخلية مريحة. كذلك أثبتت أجهزة التظليل واختيار الزجاج أنها أكثر الاستراتيجيات فعالية. أظهرت النتائج أن المبنى المحسن يوفر حوالي 90% التدفئة و55% للتبريد. بالإضافة إلى ذلك، من الممكن تقليل الاستهلاك السنوي للطاقة إلى 3 كيلووات/ساعة/ سنة ، وهو ما يمثل انخفاضاً بنسبة 77% مقارنة بالحالة التقليدية.

كلمات مفتاحية: راحة حرارية، تقييم الأداء الطاقوي ، مبنى سكني، كفاءة طاقوية، استراتيجيات باعثة، عزل بيئي، ألياف الخشب، للمباني ذات الطاقة الصفرية NZEB ، مناخ متوسطي دافئ رطب

CHAPITRE I : INTRODUCTION GENERALE

CHAPITRE I : INTRODUCTION GENERALE

Le défi majeure du XXI^e siècle consiste à réduire la consommation de combustibles fossiles au profit des énergies renouvelables, compte tenu des contraintes climatiques actuelles, la transition écologique s'impose comme une nécessité pour atteindre le développement durable.

Le secteur du bâtiment représente une part significative de la consommation énergétique mondiale et joue un rôle crucial dans la lutte contre le changement climatique. Il est à l'origine d'environ la moitié des matériaux extraits dans le monde (European Commission 2014). Cette consommation est liée à la qualité du confort thermique de l'environnement intérieur, les occupants utilisent à la fois la climatisation et le chauffage ce qui entraîne une consommation d'énergie accrue.

De ce fait, la réduction des consommations d'énergie est urgente pour optimiser l'utilisation des ressources et réduire les émissions de gaz à effet de serre. L'efficacité énergétique des bâtiments est devenu un aspect impératif en architecture et l'ingénierie de la construction afin de s'engager aux objectifs du développement durable (ODD) en général et à la durabilité de l'environnement bâti en particulier.

Les chiffres publiés par l'APRUE montrent qu'en Algérie, le secteur du bâtiment est le plus gros consommateur d'énergie parmi d'autres secteurs, avec 42 % de l'énergie finale totale et 32 % des émissions de CO₂. Cette consommation devrait continuer d'augmenter suite à un vaste programme de construction de nouveaux bâtiments résidentiels, notamment que ce programme de réalisation ne tient pas compte des normes d'efficacité énergétique et de confort thermique du bâtiment.

Malgré le cadre juridique existant à savoir le plan législatif et réglementaire, la Réglementation thermique et la stratégie nationale de la maîtrise d'énergie. La situation des bâtiments en matière de consommation énergétique est préoccupante notamment en raison du manque des techniques de performance énergétique et l'isolation thermique.

Dans la pratique le mur extérieur est constitué d'une double paroi en briques creuses sans isolation, les fenêtres sont munies d'un simple vitrage et l'enveloppe du bâtiment n'est pas été conçue en tenant compte des exigences climatiques. Cette configuration expose le bâtiment à des pertes thermiques importantes et compromet son efficacité énergétique, accentuant ainsi les défis liés au confort thermique et à la consommation d'énergie.

CHAPITRE I : INTRODUCTION GENERALE

La maîtrise de la notion d'efficacité énergétique repose sur la définition et l'application de l'ensemble des techniques ainsi que les solutions et les pistes de réflexion qui s'intéressent à cette problématique. Des solutions qui peuvent être actives, passives ou bien qui sont liées au comportement du consommateur, la focalisation se fera sur les solutions les plus adaptées au climat local et les techniques qui n'exigent pas une énergie pour leurs fonctionnements et sans bousculer les habitudes constructives.

Dans cette perspective, évaluer la performance énergétique des bâtiments revêt une importance cruciale dans le contexte actuel de recherche des solutions durables face aux défis énergétiques mondiaux. Précisément, les régions à climat tempéré méditerranéen présentent des caractéristiques uniques, combinant des aspects climatiques spécifiques avec des exigences croissantes en matière d'efficacité énergétique dans le secteur du bâtiment.

La revue de la littérature indique que plusieurs recherches ont exploré la thématique liée à la qualité environnementale du bâtiment en général et plus spécifiquement celle relative aux différents aspects et facteurs qui influencent l'efficacité énergétique des bâtiments résidentiels, tel que les stratégies passives, le type et l'épaisseur de l'isolant, les caractéristiques des fenêtres ainsi que les systèmes HVAC du chauffage, de ventilation et de climatisation. L'ensemble de ces études de recherche soulignent la pertinence de l'application d'issues et de solutions pratiques par rapport aux contraintes climatiques de chaque cas d'étude.

Dans le contexte climatique méditerranéen algérien plusieurs études ont exploré l'impact de divers paramètres de l'enveloppe des bâtiments sur leur consommation énergétique.

Par exemple, Imessad et al. (2014) ont examiné les caractéristiques thermo-physiques des parois des bâtiments, tandis qu'Ali-Toudert (2017) a discuté de l'influence des mesures de conception passive les plus efficaces pour minimiser les besoins en chauffage et en refroidissement. De même, l'étude de Badech (2020) a mis en évidence l'importance des propriétés des fenêtres pour l'efficacité énergétique. En revanche, Semahi et al. (2019) ont exploré les stratégies de conception bioclimatique les plus efficaces dans six zones climatiques différentes à travers l'Algérie.

Toutefois, il est essentiel de souligner que peu d'études se sont penchées sur l'optimisation de la performance énergétique et du confort thermique de bâtiments qui est

CHAPITRE I : INTRODUCTION GENERALE

inhérente à l'utilisation d'un isolant écologique et à la consommation énergétique quasi nulle (NZEB) dans le contexte climatique méditerranéen algérien.

Ainsi donc, l'exploration et la définition de différentes variables liées à cette problématique de recherche ont permis de mettre en évidence le programme de recherche suivant :

I.1 La question de recherche principale :

Quel est l'impact des stratégies passives et l'isolation écologique sur le degré de confort thermique et l'efficacité énergétique au niveau des bâtiments résidentiels dans un climat tempéré chaud méditerranéen ?

I. 2 Questions de recherche secondaires :

- 1- Quelles sont les caractéristiques climatiques du climat tempéré chaud méditerranéen ?
Comment s'y intégrer ?
- 2- Quel est le degré d'intégration de la réglementation visant la performance énergétique des bâtiments dans les deux cas d'étude ?
- 3- Quelles sont les stratégies énergétiquement plus efficaces du bâtiment à énergie quasiment nulle NZEB dans le même contexte ?

I.3 Les hypothèses de recherches :

1. Les normes et exigences de la performance énergétique du bâtiment n'ont pas été appliquées et intégrées dans les bâtiments résidentiels ce qui entraîne une consommation énergétique élevée.
2. Les stratégies passives qui améliorent le plus la performance énergétique et le confort thermique dans le climat tempéré méditerranéen sont : le type de l'isolant thermique et la qualité thermo-physique des parois, le type du vitrage et les protections solaires.

I.4 Les objectifs de recherche :

1. Exploration et définition des concepts du confort thermique et de l'efficacité énergétique ainsi que les stratégies efficaces pour la détermination d'un environnement confortable en climat méditerranéen chaud et humide.
2. Évaluation de la qualité du confort thermique et de l'efficacité énergétique a travers la conduction d'une étude de cas afin de mettre en évidence les problèmes et difficultés liés à la conception et la programmation du logement en général, et plus particulièrement la défaillance des applications des normes et standards en relation avec les conditions durables environnementales et de l'efficacité énergétique.
3. Développement d'une étude de modélisation et de simulation afin d'évaluer l'application des stratégies du confort thermique et de la performance énergétique.
4. Développement de conclusions et de recommandations en termes de confort thermique et d'efficacité énergétique d'un bâtiment et NZEB (Nearly Zéro Energy Building) qui intègre d'une manière cohérente les principes de conceptions des stratégies passives et actives pour les régions du climat tempéré méditerranéen.

I.5 La Méthodologie de Recherche :

La présente recherche conjugue deux approches, expérimentale et modélisation numérique, afin d'étudier le comportement thermique et la performance énergétique des bâtiments étudiés. Le confort thermique adaptatif des occupants a été examiné dans le but d'identifier les solutions les plus optimales et des solutions détaillées de conception passive.

Deux bâtiments à usage résidentiel ont été choisis pour cette étude, chacun représentant des caractéristiques spécifiques en vue d'établir une comparaison entre un bâtiment classique, offrant un état des lieux du bâtiment résidentiel actuel, et un bâtiment amélioré avec une enveloppe plus performante.

Tout d'abord, une étude expérimentale avec des mesures in situ a été réalisée sur deux cas d'étude afin d'évaluer deux variables : le confort thermique et l'efficacité énergétique. Cette démarche vise à confirmer les lacunes des bâtiments, notamment la non-intégration

CHAPITRE I : INTRODUCTION GENERALE

des normes et exigences en matière de performance énergétique, entraînant ainsi une consommation énergétique élevée.

Les espaces principaux du bâtiment ont été équipés d'appareils de mesure, notamment un enregistreur de données permettant la collecte de données liées à la température de l'air et à l'humidité relative. De plus, la température surfacique intérieure des parois a été relevée à l'aide d'un thermomètre infra rouge, et la vitesse de l'air dans l'espace de vie principal pendant les périodes de refroidissement et de chauffage a été mesurée à l'aide de l'anémomètre thermique TA 300.

Par la suite, une simulation numérique thermodynamique a été élaborée dans le but de modéliser la consommation énergétique après l'adoption de chaque stratégie. Ces stratégies comprennent quatre types de parois isolées, l'utilisation de vitrage à faible émissivité, l'installation de protections solaires, ainsi que l'étude de l'impact de la ventilation naturelle. Un modèle de simulation a été créé à l'aide du logiciel Trnsys 16, en se basant sur des scénarios réels d'utilisation et d'occupation. Ceci a été élaboré en utilisant les résultats obtenus à partir de l'enquête réalisée sur le terrain et des données du projet.

Le modèle de simulation a été vérifié et calibré selon les directives du Standard ASHRAE 14 de 'l'American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers' (ASHRAE Guideline, 2002). En outre, la calibration était une étape essentielle pour permettre la création d'un modèle de simulation fiable. Après la validation du modèle, la performance du bâtiment a été évaluée ainsi le degré d'efficacité de l'isolation écologique et des mesures passives sur le confort thermique et l'efficacité énergétique a été évalué.

I.6 Structure de la thèse :

Le manuscrit se compose de sept chapitres suivis d'une conclusion générale et d'une mise en perspective du programme de recherche.

Le premier chapitre de cette thèse présente la problématique liée à l'efficacité énergétique des bâtiments, de plus le problème de recherche a été précisé tout en délimitant la question de recherche, les hypothèses et les objectifs de recherche, ainsi la méthodologie de recherche et la structure de la thèse.

Le deuxième chapitre décrit les généralités sur l'efficacité énergétique dans le bâtiment et met en évidence les techniques et approches de réduction de l'utilisation de l'énergie.

CHAPITRE I : INTRODUCTION GENERALE

Dans un premier temps, nous élaborons un rappel historique sur la notion du bâtiment à faible consommation énergétique et le bâtiment à haute performance. Dans un second temps, nous définissons les approches du bâtiment à basse consommation énergétique.

Le troisième chapitre explore le confort thermique en climat tempéré méditerranéen, en mettant l'accent sur les aspects liés au gène et au confort. La première partie du chapitre explore les généralités sur le climat, avec une attention particulière portée à la délimitation du domaine méditerranéen et à sa classification climatique, en se concentrant spécifiquement sur le climat tempéré chaud méditerranéen. La deuxième partie, aborde le confort thermique et les techniques de l'architecture traditionnelle et vernaculaire.

Le quatrième chapitre examine les stratégies les plus couramment employées dans les projets concrets de bâtiments à énergie quasi nulle_ NZEB dans le contexte général, en mettant particulièrement l'accent sur les régions à climat méditerranéen. L'objectif est de fournir les informations nécessaires pour améliorer la performance énergétique des bâtiments étudiés, en se concentrant sur les paramètres liés à l'enveloppe du bâtiment et les stratégies et systèmes énergétiques intégrés au NZEB dans le contexte méditerranéen.

Le cinquième chapitre entreprend une analyse du contexte climatique énergétique, environnemental de la ville de Bejaia. La première partie de ce chapitre explore le contexte du secteur résidentiel en Algérie, en mettant l'accent sur la consommation énergétique et la qualité environnementale et énergétique. La deuxième partie, aborde la présentation et les caractéristiques climatiques de la ville. La dernière partie, aborde l'analyse bioclimatique la ville de Bejaia.

Le sixième chapitre présente l'investigation menée sur deux bâtiments d'étude afin d'évaluer deux variables : le confort thermique et l'efficacité énergétique, ainsi que leurs implications sur la performance énergétique et environnementale. Dans un premier temps, l'investigation du premier cas du logement social a été menée et les résultats d'une enquête réalisée de porte à porte ont été déterminés. Ensuite L'investigation du deuxième cas de la résidence promotionnel a été entreprise, ce qui a permis d'étudier le confort ressenti dans les appartements et de choisir ceux à instrumenter. Enfin, une étude d'évaluation de la consommation énergétique annuelle des deux bâtiments a été conduite ce qui a permis de réaliser une étude comparative de leurs performances énergétiques.

CHAPITRE I : INTRODUCTION GENERALE

Le septième chapitre évalue l'influence des stratégies de performance énergétique et thermique sur le bâtiment de référence (logement social) en utilisant une configuration optimale dérivée des recommandations d'améliorations basées sur les bâtiments à énergie quasi nulle (NZEB) en climat méditerranéen. La première section de ce chapitre traite de l'étape de calibration et de validation après la création du modèle de simulation numérique, nécessaire pour mener une étude paramétrique à l'aide du logiciel TRNSYS.

La dernière partie englobe l'évaluation de l'impact des stratégies sur la consommation énergétique et le confort thermique du bâtiment de référence (cas du logement social).

La conclusion de cette thèse explore et détermine les principaux aspects qui sont liés à la performance énergétique et le confort thermique d'un bâtiment résidentiel en climat tempéré chaud méditerranéen, aussi elle développe un ensemble de recommandations et quelques issues de réflexions supplémentaires dans les perspectives de ce travail.

**CHAPITRE II : GENERALITES SUR L'EFFICACITE
ENERGETIQUE DANS LE BATIMENT**

Introduction

La conception de bâtiments à faible consommation d'énergie requiert une approche complexe, prenant en compte divers paramètres tels que la forme du bâtiment, son orientation, son implantation et le traitement de son enveloppe. Cette démarche implique l'application des principes de l'architecture bioclimatique et de la conception solaire passive, visant à assurer le confort thermique tout en réduisant la consommation énergétique. En complément, des techniques et systèmes mécaniques actifs sont souvent nécessaires.

L'objectif central de ce chapitre est de définir le concept d'efficacité énergétique et d'exposer les techniques et approches visant à réduire l'utilisation de l'énergie. Ces stratégies peuvent être regroupées en trois catégories distinctes : les stratégies passives, les stratégies actives, et le comportement des usagers.

La première section de ce chapitre aborde la définition des concepts clés liés à l'efficacité énergétique. La deuxième partie se consacre à la définition des techniques de réduction de la consommation énergétique. Enfin, la dernière partie explore le concept de bâtiment à zéro carbone.

2.1 Le vocabulaire du développement durable et la construction durable :

La prise de conscience des risques liés à la révolution industrielle sur la santé humaine et l'environnement a émergé vers la fin des années 60. En 1968, le Club de Rome a constaté la dégradation de l'environnement et la forte croissance de la population mondiale à travers une étude prospective sur les conséquences du maintien de la croissance sur les ressources, le développement industriel, la pollution et la population. La célèbre publication qui en est issue en 1972, intitulée « Halte à la croissance », exprime la nécessité d'associer la protection de la nature au développement économique. Elle préconise également de mettre l'accent sur le contrôle de la population mondiale, la réduction de l'utilisation des ressources non renouvelables, le développement industriel, la maîtrise de l'énergie et l'éducation des citoyens à l'environnement (Pierre, 2003).

Après la publication susmentionnée, diverses opinions ont émergé concernant le discours sur le développement durable, soulignant qu'il représente une idée plus vaste qu'une seule définition ne peut pleinement saisir, selon Richard C. et al. en 1997. En 1987, la Commission mondiale sur l'environnement et le développement a produit le rapport

Chapitre II : GENERALITES SUR L'EFFICACITE ENERGETIQUE DANS LE BATIMENT

Brundtland intitulé "Notre avenir à tous". Ce rapport a souligné le besoin d'un développement durable visant à améliorer la qualité de vie actuelle tout en répondant aux besoins à long terme de la population mondiale. Il a défini le développement durable comme une croissance économique et sociale intrinsèquement liée à la protection de l'environnement et à l'utilisation contrôlée des ressources naturelles, citant : "Le développement durable est un développement qui répond aux besoins du présent sans compromettre la capacité des générations futures à répondre aux leurs" (WCED, 1987).

Suite à cet élan, le Sommet de la Terre à Rio de Janeiro a été organisé en 1992, réunissant les chefs d'état engagés dans la recherche conjointe de voies pour le développement durable. Les principes déclarés à Rio étaient associés à un programme de développement pour le XXI^e siècle, connu sous le nom d'Action 21 ou Agenda 21. Ce plan d'action implique tous les secteurs de la société dans le processus de durabilité et de développement durable.

2.1.1 La durabilité dans le cadre bâti :

Pour décrire la responsabilité de l'industrie de la construction dans la réalisation de la "durabilité" (Richard, 1997), le terme "construction durable" a été proposé. En 1992, le Conseil International du Bâtiment (CIB), à travers les travaux d'atelier du groupe 8 (CIB, 2023) sur le thème de l'évaluation du bâtiment, a impulsé la mise en œuvre de normes et d'outils d'évaluation du bâtiment. Les travaux d'atelier du groupe 16 ont également contribué à l'application des principes de la durabilité dans le cadre bâti.

En 1994, Kibert (Kibert, 1994b) a proposé une définition pour la construction durable, consistant à créer et exploiter un environnement bâti sain fondé sur l'efficacité des ressources et la conception écologique. Cette définition s'articule autour de sept principes fondamentaux à appliquer aux ressources nécessaires (terre, matériaux, eau, énergie et écosystèmes) pour la création de l'environnement bâti tout au long de son cycle de vie. Ces principes sont :

1. Réduire la consommation de ressources (réduire).
2. Réutiliser les ressources (réutilisation).
3. Utiliser des ressources recyclables (recycler).
4. Protéger la nature (nature).
5. Éliminer les substances toxiques (toxiques).
4. Appliquer le coût du cycle de vie (économie).
7. Mettre l'accent sur la qualité (qualité).

Chapitre II : GENERALITES SUR L'EFFICACITE ENERGETIQUE DANS LE BATIMENT

L'évolution des idées et du concept de développement durable amène à une notion du bâtiment qui fait intervenir les liens entre la préservation des ressources naturelles, la réduction de la pollution et l'impact du bâtiment sur l'environnement, dans les différentes étapes du cycle de vie du bâtiment, cette notion du bâtiment durable et bâtiment vert est une réponse du secteur de la construction afin d'intégrer la durabilité à l'environnement bâti.

2.2 Le bâtiment et le défi du carbone :

De nombreuses études ont démontré que l'industrie du bâtiment est le principal contributeur aux émissions de gaz à effet de serre (GES) (T. Wang et al. 2016), et la principale source d'émissions de gaz à effet de serre provenant des bâtiments est la consommation énergétique (UNEP SBCI, 2009). Les bâtiments utilisent plus de 40% de l'énergie mondiale et sont responsables d'un tiers des émissions mondiales de gaz à effet de serre pour les pays développés et les pays en voie de développement (UNEP SBCI, 2009). Par rapport à d'autres secteurs, la réduction des émissions de GES dans le secteur du bâtiment a été largement reconnue comme l'un des moyens les plus efficaces afin d'éliminer l'impact négatif des changements climatiques.

La consommation d'énergie liée à l'exploitation des bâtiments a un impact significatif sur les émissions de gaz à effet de serre (GES) des bâtiments (F. Meggers et al. 2012). De plus, la stratégie du bâtiment durable et du bâtiment efficace en énergie se concentre principalement sur les consommations d'énergie dans la phase d'exploitation et les émissions de GES associées, notamment pour la climatisation, l'éclairage et le chauffage (J. Iwaro et al. 2010).

Cependant, les matériaux de construction du bâtiment engendrent une consommation d'énergie liée à l'extraction, à la production et au transport, appelée "énergie grise", ainsi que des émissions de CO₂ inhérentes, nommées "émissions grises". Ces aspects représentent également une part non négligeable des émissions totales de GES (Koeppel et al. 2007), (Wang et al. 2014). Cette dimension doit être prise en compte lors de la conception du bâtiment afin de tenir compte de tous les impacts du bâtiment sur les émissions de CO₂ et la pollution (Vieira et al. 2008).

L'efficacité énergétique au niveau du bâtiment peut réduire les émissions de carbone de 60% ou plus, ce qui se traduit par 1,35 milliard de tonnes de carbone (Tzikopoulos, Karatza, and Paravantis 2005).

Chapitre II : GENERALITES SUR L'EFFICACITE ENERGETIQUE DANS LE BATIMENT

Réduire les émissions de gaz à effet de serre et de CO₂ liées aux opérations de construction des bâtiments, ainsi que leurs impacts négatifs sur l'environnement, est un défi qui nécessite l'intervention d'experts à l'échelle mondiale (Meggers et al. 2012), (Hoffert et al. 2002). De plus, de nouvelles méthodes et matériaux de construction ont été explorés en vue de réviser la production de l'environnement bâti (Meggers, F., Ritter et al. 2011).

2.2.1 Approches de réduction des émissions de carbone :

Afin de réduire l'empreinte carbone de l'environnement bâti, plusieurs stratégies ont été développées. Ces technologies peuvent être classées en cinq catégories, en fonction de leur impact sur l'environnement et l'économie d'énergie (Jianrong et al. 2011) :

1. Utilisation de nouvelles sources énergétiques telles que l'énergie solaire, éolienne et géothermique pour réduire directement les émissions issues de l'énergie électrique et du gaz naturel.

2. Amélioration de l'efficacité énergétique du bâtiment pour diminuer la consommation énergétique grâce à l'utilisation de stratégies de conception passive et active. Cela inclut l'optimisation des techniques de ventilation et de refroidissement, l'isolation thermique des murs, des fenêtres et des portes, l'intégration de l'éclairage naturel, et l'utilisation d'équipements et de systèmes de conditionnement d'air efficaces, ayant un impact significatif sur la réduction des émissions de carbone.

3. Réduction de la charge de dioxyde de carbone dans l'environnement en utilisant des matériaux de construction durables et recyclables, ainsi qu'en recyclant les déchets lors des processus de construction et de démolition.

4. Gestion et diffusion du modèle du bâtiment à bas carbone et mise en place d'un système de surveillance des émissions du secteur du bâtiment.

5. Séquestration et stockage du carbone par l'utilisation de toitures végétalisées et de murs végétalisés à l'intérieur et à l'extérieur des bâtiments.

De plus, réduire l'impact du changement climatique des bâtiments résidentiels est l'objectif de nombreuses recherches scientifiques. En particulier, l'utilisation du bois dans la construction en tant que matériau de construction contribue à la diminution des émissions de CO₂ sur l'ensemble de sa durée de vie, comparativement à d'autres matériaux préfabriqués (Balasbaneh et al, 2017).

Chapitre II : GENERALITES SUR L'EFFICACITE ENERGETIQUE DANS LE BATIMENT

2.2.2 Bâtiment à zéro carbone « ZCB » et Bâtiment à zéro énergie « ZEB » :

La construction de bâtiments et de maisons est la principale source de la demande mondiale d'énergie et de matériaux qui produit du gaz à effet de serre. La réduction des émissions GES est essentielle afin de maintenir la température terrestre et lutter contre le réchauffement climatique.

Les bâtiments ont le plus d'opportunité de réduire les émissions de GES, c'est pour cela l'approche du bâtiment zéro carbone (ZCB) a été adoptée dans de nombreux pays comme une stratégie gouvernementale face au changement climatique (W Pan, 2012 ; Wilford, 2009).

En général, les termes «zéro énergie», «zéro carbone» sont appliqués aux bâtiments qui utilisent des sources d'énergie renouvelables sur site afin de produire l'énergie nécessaire pour leur fonctionnement, depuis sur une année la quantité d'énergie produite sur site est égal à la quantité d'énergie requise par le bâtiment (Australian Government, 2008).

a) Bâtiment à zéro énergie « ZEB » :

Le concept du bâtiment à zéro énergie (ZEB) s'appuie sur deux principes fondamentaux : l'efficacité énergétique et l'utilisation de sources d'énergie renouvelables, disponibles soit sur le site de la construction, soit à l'extérieur de celui-ci (Torcellini, 2006). Parmi les mesures d'efficacité énergétique, citons le chauffage solaire passif et l'éclairage naturel, qui doivent être soigneusement évalués pour garantir leur persistance dans l'économie d'énergie tout au long de la durée de vie du bâtiment.

Pour assurer l'approvisionnement énergétique nécessaire au ZEB, des sources d'énergie renouvelables peuvent être situées sur le site, telles que des installations photovoltaïques et des chauffe-eau solaires installés sur le toit, ou provenir de l'extérieur du site de construction, incluant la biomasse, les granulés de bois, les systèmes éoliens ou photovoltaïques installés dans des parcs de stationnement (Torcellini et al, 2006).

Le ZEB est défini comme un bâtiment qui produit annuellement au moins autant d'énergie qu'il en consomme (Hui, 2010), et quatre définitions couramment utilisées sont le net zéro site energy, le net zéro source energy, le net zéro energy costs et le net zéro energy emissions (Torcellini, 2006).

Les concepts liés aux ZEB et ZCB incluent d'autres termes tels que le bâtiment autonome en énergie, le bâtiment à énergie positive, le bâtiment à énergie quasi-nulle et le bâtiment à ultra-bas énergie, comme résumé dans le tableau 2.1. Bien que les ZEB et les bâtiments verts partagent l'objectif commun de réduire la consommation énergétique et les

Chapitre II : GENERALITES SUR L'EFFICACITE ENERGETIQUE DANS LE BATIMENT

émissions de gaz à effet de serre, les bâtiments verts n'adoptent pas toujours le principe du zéro énergie. De plus, le ZEB ne peut être considéré comme un bâtiment vert en ce qui concerne la réduction des déchets, l'utilisation de matériaux recyclables et la prise en compte de l'énergie nécessaire à la construction et au transport du bâtiment.

Table 2. 1 Concepts reliés au ZEB et ZCB (Hui, 2010).

Terms	Definitions / Meanings
Autonomous or self-sufficient building	A building designed to be operated independently from infrastructural support services e.g. electricity grid, municipal water systems, sewage treatment systems, storm drains, communication services
Energy-plus/-positive building (E+B)	A building that produces a surplus of energy during a year
Green building (GB)	A building that reduces the environmental impact while improving environmental sustainability
Low energy building (LEB)	Building developments that facilitate or use low levels of energy (than regular buildings)
Off-the grid building	A building that is completely self-sufficient and stand-alone. It is not connected to an off-site energy utility facility. It requires distributed renewable energy sources AND energy storage capability
Passive (energy) building	Passive house (passivhaus in German); passive solar building; ultra-low energy, through passive design; does not include active systems e.g. mechanical ventilation or photovoltaic.

b) Bâtiment à zéro Carbone «ZCB» :

Le concept de bâtiment à zéro carbone (ZCB) est désigné par différents termes dans les 14 États membres de l'UE, avec 23 expressions différentes pour décrire les "bâtiments à haute performance" (Erhorn et al, 2011). Ces termes se répartissent en plusieurs catégories :

Faible consommation d'énergie : Maison à basse consommation d'énergie, maison économe en énergie, maison à très basse consommation, maison de 3 litres, maison à zéro énergie de chauffage, maison à zéro énergie, maison à énergie plus, maison à très basse consommation d'énergie, maison autosuffisante en énergie, maison à énergie autarcique.

Faibles émissions : Maison à zéro émission, maison à zéro carbone, maison sans émissions, maison sans carbone.

Durabilité : Éco-bâtiments, bâtiments verts, code pour les maisons durables, maison bioclimatique, climatique et maison active.

La diversité de cette terminologie complique la définition précise du concept de bâtiment à zéro carbone (ZCB). Les recherches scientifiques proposent des termes qui

Chapitre II : GENERALITES SUR L'EFFICACITE ENERGETIQUE DANS LE BATIMENT

intègrent davantage de paramètres que simplement le carbone et l'énergie, en utilisant des expressions spécifiques telles que la construction verte ou l'éco-construction. Ces termes peuvent être regroupés en quatre catégories distinctes (voir la Figure 2.1) (W Pan, 2014) :

Groupe 1 : Termes basés sur le carbone et l'énergie dans un contexte spécifique, tels que ZCB et bâtiment à émission zéro, ainsi que des termes se basant sur la consommation d'énergie, comme ZEB.

Groupe 2 : Termes basés sur le carbone et l'énergie dans un contexte général, tels que le cycle de vie ZCB et ZEB.

Groupe 3 : Termes avec une portée plus large que le carbone et l'énergie dans un contexte spécifique, comme les bâtiments certifiés BREEAM au Royaume-Uni et les bâtiments certifiés BEAM Plus à Hong Kong.

Groupe 4 : Termes généraux dans le contexte général, tels que le bâtiment écologique et l'éco-construction.

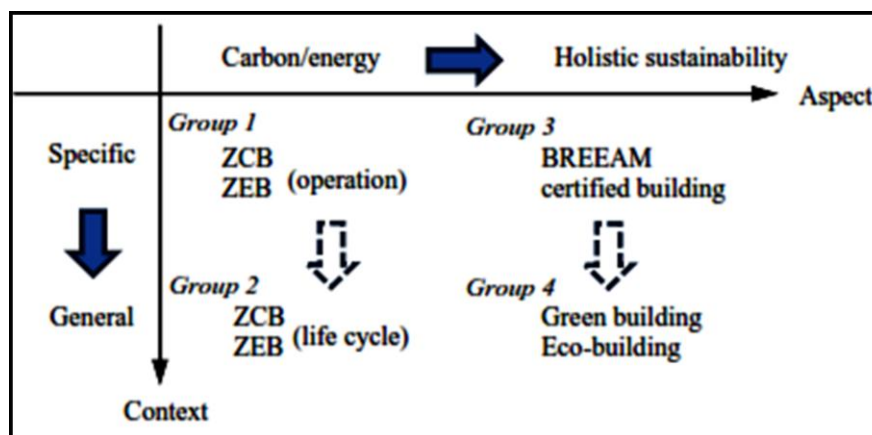


Figure 2.1 Catégorie des termes liés au bâtiment à zéro carbone, source (W. Pan, 2014).

Un bâtiment à zéro émission de carbone est un édifice qui n'émet aucune quantité de dioxyde de carbone résultant de la consommation énergétique pendant son exploitation. Cela englobe l'énergie utilisée pour la cuisine, les ordinateurs, ainsi que d'autres appareils, et couvre des aspects énergétiques tels que le chauffage des locaux, l'eau chaude, la ventilation et l'éclairage (Hui, 2010 ; DCLG, 2006).

2.3 Le bâtiment à haute performance :

La notion de "haute performance" vise généralement à distinguer les bâtiments conçus à un niveau supérieur de performance, dépassant un certain pourcentage de référence par rapport à la norme. La performance d'un bâtiment est définie par rapport à un code du bâtiment, mesurée et analysée après la construction pour vérifier les objectifs de

Chapitre II : GENERALITES SUR L'EFFICACITE ENERGETIQUE DANS LE BATIMENT

performance prévus. Cette définition évolue dans le temps, car ce qui était considéré comme haute performance il y a 5 ans peut ne plus l'être aujourd'hui, la ligne de base des objectifs minimaux augmentant avec les changements dans les codes du bâtiment (Robinson, 2014).

Deux ans après la première définition du bâtiment à haute performance, la loi américaine redéfinit le terme en tant que "bâtiment à hautes performances", englobant tous les principaux aspects de la haute performance sur une base de cycle de vie. Cela inclut l'économie d'énergie, l'aspect environnemental, la sécurité, la durabilité, le rapport coût-bénéfice, la productivité, la fonctionnalité et les considérations opérationnelles (PUBLIC LAW, 2007).

Le terme "bâtiment à haute performance" est synonyme du terme "bâtiment vert" (Kibert, C. J., 2012). Il s'agit d'un projet visant à optimiser l'efficacité des ressources et à réduire significativement les coûts énergétiques. Le bâtiment à haute performance vise à maximiser les économies d'énergie, à améliorer la qualité de l'air intérieur, le confort, la santé et la sécurité des occupants, tout en limitant les effets néfastes sur l'environnement (High Performance Building Guidelines, 1999).

La haute performance nécessite l'application de certains principes dans les opérations de conception, la construction et l'installation de divers systèmes et d'équipements (High Performance Guidelines. 2001), un accent particulier sur les principes suivants :

- la durabilité, qui est une vision à long terme qui équilibre l'économie, l'équité et Impacts sur l'environnement.
- L'approche intégrée, l'intégration d'installation des équipements dans la phase de conception et de construction puisque cela a un rôle important sur la performance de l'équipement, et pour cela une collaboration d'une équipe multidisciplinaire est indispensable.
- Evaluation et collecte d'informations : cette phase est nécessaire pour l'optimisation des procédés, les étapes et les techniques utilisées dans le projet, et les informations collectées quantifient la performance des systèmes et l'efficacité du processus, et leurs coûts, pour améliorer d'avantage la conception future.

Ce sont les systèmes d'évaluation des bâtiments qui donnent une définition au bâtiment vert pour le pays qui les utilise. Aux États-Unis, par exemple, le système d'évaluation des bâtiments LEED (Leadership in Energy and Environmental Design) définit le bâtiment vert pour le marché américain (Kibert, 2016).

2.3.1 Le Concept De L'efficacité Énergétique Dans Le Bâtiment :

Le concept de l'efficacité énergétique dans le bâtiment, défini par plusieurs chercheurs, est lié à la quantité d'énergie produite nécessaire pour atteindre les conditions environnementales souhaitables, minimisant ainsi la consommation énergétique (Omer, 2008). Il vise à réduire à la source la quantité d'énergie nécessaire pour un même service, en optimisant l'utilisation de l'énergie tout en maintenant une qualité de vie constante (Salomon, 2004), soit consommer le moins d'énergie possible pour le même service.

Le processus de conception d'un bâtiment à faible consommation d'énergie est complexe. La première étape consiste à utiliser des stratégies de conception passive pour minimiser les coûts de chauffage, de refroidissement, de ventilation et d'éclairage. Il faut également prendre en compte le comportement des utilisateurs. En complément, des stratégies actives, utilisant la technologie, sont mises en œuvre pour compenser les limitations des techniques passives.

Au cours de la dernière décennie, un processus de conception de bâtiments à faible consommation d'énergie a émergé, permettant la réalisation de bâtiments avec une consommation d'énergie primaire de 100 kWh/m²/an. Dix étapes essentielles sont impliquées dans la conception d'un bâtiment à faible consommation énergétique et à faible empreinte carbone (Kibert, 2016) :

1. Utiliser des outils de simulation d'énergie du bâtiment tout au long du processus de conception.
2. Optimiser la conception solaire passive du bâtiment
3. Maximiser la performance thermique de l'enveloppe du bâtiment.
4. Minimiser les charges internes du bâtiment.
5. Maximiser la lumière du jour et l'intégration d'un système d'éclairage à haute efficacité.
4. Concevoir un système à haute efficacité pour le : chauffage, de ventilation et de climatisation (HVAC) pour réduire la consommation d'énergie.
7. Choisir des équipements et appareils à haut efficacité.
8. Maximiser l'utilisation des systèmes d'énergie renouvelable.
9. Récupérer et utiliser l'énergie résiduelle.
10. Incorporer des stratégies émergentes novatrices.

Différents facteurs influencent l'utilisation de l'énergie dans les bâtiments. Par ailleurs, l'Agence internationale de l'énergie (AIE) identifie six facteurs qui déterminent la

Chapitre II : GENERALITES SUR L'EFFICACITE ENERGETIQUE DANS LE BATIMENT

consommation énergétique dans les bâtiments : le climat, l'enveloppe du bâtiment, les systèmes énergétiques et les services du bâtiment, l'exploitation et la maintenance du bâtiment, le comportement des occupants, la qualité de l'environnement intérieur (fig. 2.2).

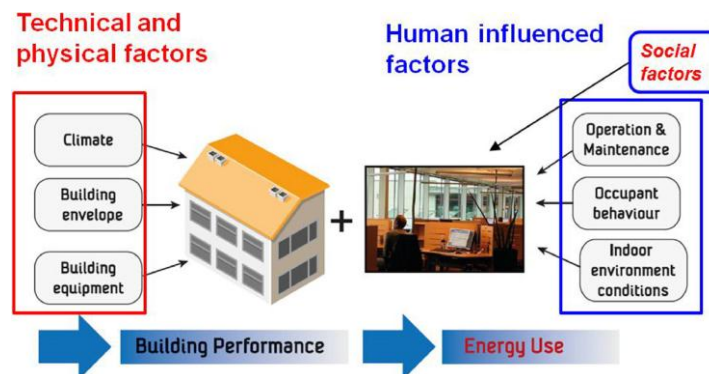


Figure 2.2 Six facteurs influent sur la consommation énergétique du bâtiment. Source (Yoshino, et al, 2017)

2.3.2 Les stratégies passives de l'efficacité énergétique :

Les stratégies passives de l'efficacité énergétique visent à atteindre le confort et l'efficacité énergétique par des mesures architecturales et constructives. Elles englobent des aspects tels que la compacité du bâtiment, la distribution des volumes, l'orientation, l'emplacement des ouvertures, l'isolation thermique, la ventilation naturelle, le chauffage solaire passif et le refroidissement passif.

Plusieurs concepts définissent la conception des bâtiments à efficacité énergétique (Feist. 1998 ; Klingenberg K. 2008 ; Constantin et all. 2015), implique un équilibre dans la conception, tenant compte des détails des phénomènes thermiques et des gains de chaleur internes. L'implantation du bâtiment joue un rôle crucial (Figure 2.3), visant à maximiser la ventilation estivale tout en minimisant les expositions aux vents hivernaux. L'orientation par rapport au soleil et les ombres sont également des considérations importantes pour optimiser les apports solaires en hiver et les minimiser en été.

Chapitre II : GENERALITES SUR L'EFFICACITE ENERGETIQUE DANS LE BATIMENT

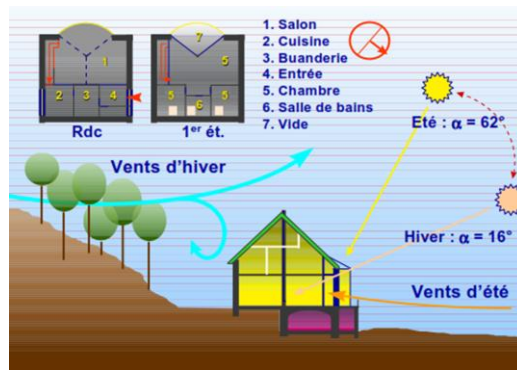


Figure 2.3 L'implantation du bâtiment en tenant compte des vents, l'ensoleillement et du relief. Source : (Liebard, 2005)

Pour concevoir un bâtiment éco énergétique, plusieurs stratégies passives sont mises en œuvre :

- Tout d'abord, la géométrie du bâtiment est optimisée pour obtenir un coefficient de compacité minimal, en veillant à ce que la surface d'enveloppe par volume soit inférieure à 1.
- Des dispositifs d'ombrage, tels que balcons, surplombs, stores vénitiens, treillis, terrasses et arbres, sont déployés pour réduire l'impact des rayons solaires d'été.
- Une isolation efficace des murs et des fenêtres est cruciale. Cela implique l'utilisation d'un isolant offrant une efficacité maximale, garantissant une faible perméabilité à l'air et évitant les ponts thermiques (Figure 2.4).
- Une connexion adéquate entre les éléments de l'enveloppe est assurée pour prévenir les condensations et les pertes de chaleur locales.
- L'usage de matériaux naturels à faible transformation et à faible contenu chimique est privilégié.
- L'intégration de murs de stockage thermique permet d'absorber le rayonnement solaire et de maintenir une température intérieure stable.
- Pour diminuer la consommation énergétique du bâtiment, il faut réduire au minimum : les déperditions par les parois opaques, les déperditions par les vitrages, les pertes par infiltrations et renouvellement d'air, et pour ce faire, il faut (SIDLER., 2000) (Liebard, De herde 2005):

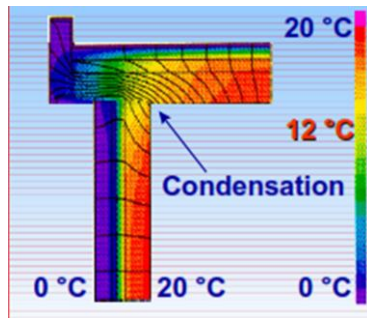


Figure 2.4 Les ponts thermique et le risque de condensation dans un détail de raccord de toiture, (source : Liébard, 2005).

- Protection contre l'humidité : pour l'enveloppe du bâtiment les matériaux utilisés doivent limiter la pénétration de la vapeur d'eau d'un côté et permettre le séchage de l'enveloppe de l'autre côté, et un pare-vapeur peut être utilisé pour réduire le taux de transmission des vapeurs. En plus la ventilation naturelle de la façade évacue l'humidité de l'enveloppe.

-Sources de chaleur internes, occupation : à considérer lors de la conception toutes sources de chaleur interne (appareils électriques, éclairage, personnes, etc.)

-La ventilation et la récupération de chaleur, pour un confort optimal : Un débit d'air de 20-30 m³/h par personne ou d'au moins 0,3 à 0,35 h⁻¹ de taux de renouvellement d'air doit être pris en compte. Cela permet de maintenir un cycle d'air dont la concentration en CO₂ est inférieure ou égale à 0,1%, avec l'utilisation d'un récupérateur de chaleur assurant des pertes minimales de chaleur.

-La conception solaire passive : Cette approche de construction permet d'atteindre de températures ambiantes confortables avec la conception de chauffage, climatisation, et lumière et les systèmes de ventilation en utilisant : l'ensoleillement, le vent, la végétation et d'autre source naturelle disponible sur le site.

En utilisant cette technique de conception passive, les deux méthodes de chauffage et de refroidissent passifs sont possibles. L'énergie solaire est utilisée pour le chauffage en utilisant plusieurs méthodes et stratégies : les procédés solaires passifs (les systèmes passifs) qui n'utilisent aucun élément mécanique pour capter et distribuer la chaleur ce système ce base sur l'intégration d'outils à la conception architecturale.

2.3.2 Les stratégies d'efficacité énergétique actives :

Les mesures actives ou technologiques : Consiste à atteindre le même but poursuivi par les installations mécaniques qui consomment une part d'énergie afin de compléter les mesures passives, voici quelques exemples : Le chauffage local ou central, la ventilation mécanique, le conditionnement d'air, capteurs à air, capteurs solaires, chauffe-eau.

Les systèmes de chauffage solaire actif et hybrides :

a) Les systèmes actifs :

L'énergie solaire est captée en utilisant un panneau solaire installé sur la toiture et la façade, cette énergie est transférée à un stock par un fluide caloporteur (air, eau), la circulation de ce fluide dépense une d'énergie, parmi les systèmes actifs répondus : Le chauffe-eau solaire et les capteurs solaires.

b) Les systèmes hybrides :

Ce type de système fonctionne tantôt en mode passif (gains directs) et actif, exemple du capteur fenêtre avec circuit d'air chaud (le capteur à air) : lorsque le rayonnement est faible le capteur fenêtre se comporte comme une fenêtre ordinaire et lorsque le rayonnement est intense, un store vénitien est abaissé entre la fenêtre intérieure et extérieure et un ventilateur assure la circulation de l'air dans un circuit fermé entre le collecteur et le stock.

c) Les techniques de refroidissement actives :

Les méthodes de refroidissement actif sont les équipements mécaniques utilisés pour satisfaire les besoins de refroidissement à l'intérieur d'un bâtiment, et ils ne sont pas fournis par la nature, pour leur fonctionnement, ils utilisent l'électricité et la chaleur comme source d'énergie (Lechner, 2009) et les plus utilisés dans le secteur résidentiel sont : les ventilateurs, les refroidisseurs par évaporation et les pompes à chaleur.

d) Les ventilateurs :

Utilisés pour créer des conditions de confort dans les climats chauds et doux, refroidissent le corps humain en favorisant l'évaporation de la sueur. Toutefois, dans les régions chaudes et sèches, cela peut entraîner déshydratation ou épuisement par la chaleur (Zhai , 2006) (Kharrufa , Adil. 2012). Les ventilateurs semblent être une option prometteuse pour le refroidissement résidentiel généralisé. Cependant, il est essentiel de prendre en compte

Chapitre II : GENERALITES SUR L'EFFICACITE ENERGETIQUE DANS LE BATIMENT

cette utilisation répandue, susceptible d'augmenter la demande mondiale en énergie pour le refroidissement (Oropeza-Perez et al. 2018). La consommation d'énergie des ventilateurs varie généralement entre 50 et 185 W, permettant de fournir environ 220 m³ d'air par heure pour une zone construite d'environ 120 m². Un ventilateur de 185 W peut induire une sensation de refroidissement allant jusqu'à 5 °C de moins dans la température intérieure du bâtiment.

e) Les refroidisseurs par évaporation :

Ils utilisent l'eau pour refroidir l'air, induisant l'absorption de chaleur sensible lors de l'évaporation des gouttes d'eau générées par l'eau (Garai, 2009). Le refroidissement du bâtiment peut être réalisé au moyen d'un appareil électrique qui aspire l'air extérieur à une température spécifique, abaisse cette température en évaporant l'eau, et produit ainsi de l'air frais et humide à l'intérieur du bâtiment (Essick B, inventeur, 1944). La consommation des refroidisseurs par évaporation varie entre 285 et 1500 W, permettant de fournir jusqu'à 10 200 m³ d'air frais par heure, soit 6000 pieds cubes par minute (CFM) pour une zone de 130 m² (Karpiscak, 1991).

Haut du formulaire.

f) Les pompes à chaleur :

Ce procédé est utilisé pour le refroidissement est pour le chauffage, il s'agit d'un dispositif qui extrait la chaleur du bâtiment vers le sol ou vers l'extérieur, généralement par l'électricité (Etheridge D, 2012 ; Allard F, 2002). Il existe deux types principaux de pompes à chaleur: les pompes à chaleur à compression qui fonctionne seulement avec l'électricité, et les pompes à chaleur à absorption qui utilise à la fois l'électricité et la chaleur donc ce type consomme moins d'énergie que les pompes à compression (National Renewable Energy Laboratory ,2001), cependant la pompe à compression est le type le plus utilisé et il applique l'un des cycles de réfrigération les plus utilisés.

Ce cycle implique la circulation d'un réfrigérant sous forme de vapeur dans un compresseur, où il est comprimé, augmentant ainsi sa température pour devenir une vapeur surchauffée (Wulfinghoff, 1999). Ensuite, la vapeur traverse un condenseur où elle se transforme en liquide en utilisant de l'air froid ou de l'eau, éliminant ainsi la chaleur supplémentaire à pression et température constantes. Le réfrigérant liquide passe ensuite à travers un détendeur, subissant une légère diminution de la pression et générant un mélange de vapeur et de liquide (Wulfinghoff, 1999). Ce mélange, à une température et

Chapitre II : GENERALITES SUR L'EFFICACITE ENERGETIQUE DANS LE BATIMENT

une pression plus basses, est complètement vaporisé dans un évaporateur intérieur d'air chaud qui, une fois refroidi, est soufflé dans le bâtiment par un ventilateur. Ensuite, pour refermer le cycle, le réfrigérant vapeur est renvoyé au compresseur.

La mise en œuvre des pompes à chaleur est plus chère que le refroidissement par évaporation et les ventilateurs, ce qui démine son utilisation dans le secteur résidentiel, en plus ces procédés utilisent les réfrigérants chlorofluorocarbones (CF), cela réduit la couche d'ozone de l'atmosphère tout en augmentant les rayonnements ultraviolet (UV). Une pompes à chaleur impact le changement climatiques par les émissions directs des fuites de réfrigérants (parfois GES) sous leurs forme gazeuse et liquide et les émissions indirects liés à la génération d'électricité (Forsén, 2005).

2.3.3 Le comportement des utilisateurs :

Le comportement des occupants est un facteur crucial influant sur la consommation énergétique des bâtiments résidentiels urbains (Shan Hu, 2017). Il se manifeste à travers des actions telles que l'allumage et l'extinction des lumières, l'activation et la désactivation des systèmes de refroidissement et de chauffage, ainsi que le réglage du thermostat (Yan, 2015). Les occupants jouent un rôle prépondérant dans la consommation d'énergie, surpassant même l'impact de la conception du bâtiment. Diverses recherches (Z.-J, 2014), (Clevenger, 2006), (Guerra Santin, 2009) ont démontré que la présence et l'interaction des occupants avec les composants du bâtiment influent considérablement sur les prévisions de consommation d'énergie, même lorsque les conditions météorologiques, l'enveloppe du bâtiment et l'équipement sont bien définis.

Le comportement des occupants nécessite des solutions techniques spécifiques qui impactent l'adaptabilité et la mise en œuvre des technologies, jouant ainsi un rôle clé dans l'évaluation des technologies utilisées dans la conception des bâtiments énergétiquement efficaces (Fabi, 2006 ; Belessiotis, 2002). De plus, le travail de (Cécile, 2016) a confirmé, par le biais de son étude sur deux résidences, que les différences de confort thermique et de consommation énergétique sont liées aux pratiques des occupants.

Le comportement des résidents qui affecte l'efficacité énergétique :

Certains comportements des résidents ont un impact significatif sur la consommation d'énergie domestique (Dong Zhao, 2016). Par exemple, les réglages des thermostats d'été et d'hiver peuvent être des indicateurs de la performance du logement résidentiel, reflétant indirectement l'efficacité des systèmes de chauffage, de ventilation et de climatisation,

Chapitre II : GENERALITES SUR L'EFFICACITE ENERGETIQUE DANS LE BATIMENT

ainsi que la performance de l'enveloppe thermique du bâtiment (Brandemuehl, 2011). En ce qui concerne le réglage de l'humidité, il est essentiel de comprendre les divers comportements liés au confort thermique des individus vivant dans des conditions climatiques variées (Z.M, 2007). De plus, la ventilation naturelle impacte le confort thermique par le biais de l'ouverture/fermeture des fenêtres et de l'utilisation de ventilateurs (Ouyang, 2009). Les occupants des logements résidentiels peuvent également influencer la consommation énergétique en utilisant des appareils tels que les lave-vaisselle, les lave-linge et les séchoirs (D.S, 2003 ; Ek, 2010).

C'est pour cela que l'éducation des occupants sur l'efficacité énergétique peut être la prochaine frontière pour les bâtiments à haute performance (Brandemuehl, 2011).

2.4 Les Approches du bâtiment à basse consommation énergétique :

La mesure de la performance énergétique du bâtiment : Pour résoudre le problème de la surconsommation énergétique des bâtiments au niveau mondiale et minimiser les effets du réchauffement climatique résultant de cette consommation non maîtrisées de l'énergie, un ensemble d'exigences sur les performances énergétiques des bâtiments a été mis en place dans le cadre du protocole de Kyoto.

La performance énergétique d'un bâtiment est la quantité d'énergie nécessaire pour répondre aux besoins énergétiques liés à une utilisation normale du bâtiment, incluant l'énergie utilisée par ses systèmes techniques qui constituent les sources de consommation énergétique : le chauffage, le refroidissement, la ventilation mécanique, la production d'eau chaude sanitaire, l'éclairage artificiel, et la consommation des ascenseurs ou des appareils électro ménagers (Parlement européen, 2002).

Du point de vue énergétique, plusieurs aspects déterminent la consommation énergétique du bâtiment : la géométrie, l'enveloppe et les matériaux influent sur les besoins énergétiques du bâtiment, tandis que les systèmes (éléments associés aux équipements techniques du bâtiment) permettent d'atteindre les besoins en confort tout en consommant une part de l'énergie (Ernesto Efrén, 2015).

Au cours des deux dernières décennies, des labels d'efficacité énergétique ont été lancés dans le but d'atteindre le confort thermique du bâtiment et de limiter sa consommation énergétique. En plus de l'évaluation de la performance énergétique, l'évaluation de la durabilité des bâtiments a émergé dans le monde entier. Les systèmes de certification et d'évaluation du bâtiment durable ont été développés par les autorités du secteur de la construction et les organisations internationales pour réduire l'impact sur l'environnement.

2.4.1 Les opérations internationales du bâtiment à basse consommation d'énergie :

Le bâtiment performant est conçu à un niveau supérieur de performance, dépassant un certain pourcentage de référence au-dessus de la norme. Il est caractérisé par l'incorporation de solutions techniques visant à atteindre une basse consommation d'énergie, incluant des stratégies passives et actives. Cela englobe une conception architecturale bioclimatique, une isolation efficace des murs et des fenêtres, l'utilisation d'un système de ventilation double flux avec récupération de chaleur, un système de génération performant tel qu'une pompe à chaleur. Une attention particulière est accordée à la perméabilité à l'air, à la gestion des ponts thermiques, et à l'intégration de sources d'énergie renouvelable.

La performance d'un bâtiment se définit par rapport à un code du bâtiment et dans le cadre de certifications, de labels ou de réglementations. Elle doit être mesurée et analysée après la construction pour vérifier les objectifs de performance prévus par la méthode d'évaluation en question. Deux types d'approches se distinguent : des approches purement énergétiques et des approches plus larges.

a) Les approches purement énergétiques des bâtiments performants :

Les approches purement énergétiques consistent en des réglementations visant la performance énergétique des bâtiments, telles que la réglementation Thermique 2005 en France (JORF, 2006) et la réglementation Energieeinsparverordnung en Allemagne (EnEV, 2004). Elles incluent également des approches sous forme de labels d'efficacité énergétique et de confort, comme Minergie® en Suisse, Passivhaus en Allemagne, et le bâtiment « zéro energy building » aux États-Unis. Dans ces approches, les critères évalués sont bien définis et quantifiables (THIERS, 2008). Les labels sont définis à plusieurs niveaux en fonction de la consommation d'énergie et du type d'opération (construction neuve ou réhabilitation). Les plus connus sont identifiés dans cette partie.

❖ Passivhaus (Allemagne) :

Le label Passivhaus est développé par l'Institut de recherche allemand Passivhaus, créé par le Dr. Wolfgang Feist en 1996 (Feist 2005 ; Passive House Institute, 2015). Ce label désigne des maisons passives qui se caractérisent par un niveau de confort thermique particulièrement élevé avec une consommation minimale d'énergie.

Chapitre II : GENERALITES SUR L'EFFICACITE ENERGETIQUE DANS LE BATIMENT

Table 2. 2 les critères du label Passivhaus :

				Criteria ¹			Alternative Criteria ²
Heating							
Heating demand	[kWh/(m ² a)]	≤	15			-	
Heating load ³	[W/m ²]	≤	-			10	
Cooling							
Cooling + dehumidification demand	[kWh/(m ² a)]	≤	15 + dehumidification contribution ⁴			variable limit value ⁵	
Cooling load ⁶	[W/m ²]	≤	-			10	
Airtightness							
Pressurization test result n ₅₀	[1/h]	≤	0.6				
Renewable Primary Energy (PER)⁷				Classic	Plus	Premium	
PER demand ⁸	[kWh/(m ² a)]	≤	60	45	30	±15 kWh/(m ² a) deviation from criteria... ...with compensation of the above deviation by different amount of generation	
Renewable energy generation ⁹ (with reference to projected building footprint)	[kWh/(m ² a)]	≥	-	60	120		

Pour qu'un bâtiment soit considéré comme une maison passive, il est nécessaire de respecter les critères présentés dans le tableau 2.2 (Passive House Institute, 2016)

1. Une demande d'énergie pour le chauffage des locaux inférieure à 15 kWh.m².an ou 10 W par mètre carré de pointe. Et dans les climats où le refroidissement actif est nécessaire, l'exigence de la demande d'énergie de refroidissement est inférieure à 15 kWh.m².an, avec une réserve supplémentaire pour la déshumidification.
2. Une consommation en énergie primaire inférieure à 60 kWh.m².an (selon Passive House Classic) pour toutes les applications domestiques (chauffage, eau chaude et électricité domestique).
3. En termes d'étanchéité à l'air, un maximum de renouvellement d'air 0,6/h à une pression de 50 Pascals.
4. Le confort thermique doit être respecté pour toutes les zones habitables en hiver et en été, avec un maximum de 10% des heures durant l'année dont la température est supérieure à 25 ° C.

Cinq principes sont à considérer dans la conception de la maison passive : conception sans pont thermique, fenêtres supérieures, ventilation avec récupération de chaleur, isolation de qualité et construction étanche à l'air voir la Figure 2.5.

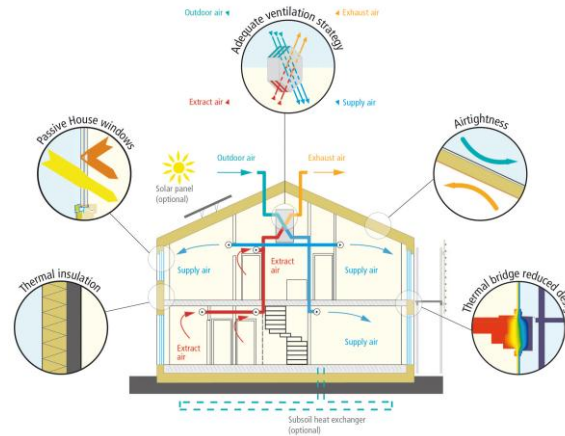


Figure 2.5 Schématisation des principes de la conception d'une maison passive (Passivhaus, 2015).

❖ MINERGIE® (EN SUISSE) :

Le label Minergie® a été introduit en Suisse en 1998, se concentrant sur le confort des bâtiments et l'efficacité énergétique (Minergie, 2018). Il repose sur une bonne isolation de l'enveloppe du bâtiment, un approvisionnement énergétique hautement efficace basé sur des sources d'énergie renouvelables, et un renouvellement contrôlé de l'air. Les différents principes de base d'un bâtiment Minergie® sont présentés dans la Figure 2.4. L'Association Minergie certifie des bâtiments selon les labels Minergie, Minergie-P et Minergie-A.

- **Le label Minergie-P** a été introduit en 2003, il désigne un bâtiment autonome, axé sur une faible consommation énergétique, et une utilisation optimisée des sources de chaleur passives, avec une excellente enveloppe du bâtiment en termes d'isolation et d'étanchéité à l'air, une attention toute particulière est également portée à la protection thermique durant la saison estivale.

Pour les nouveaux bâtiments d'habitation selon Minergie-P, l'indice Minergie s'élève à 50 kWh/m²/an et les exigences relatives à l'enveloppe du bâtiment sont au minimum 30% plus strictes que les exigences du label Minergie®.

- **Minergie-A** désigne depuis 2011 les bâtiments à énergie positive en Suisse, une maison Minergie-A présente un bilan énergétique positif. En d'autres termes, les dépenses pour le chauffage, l'eau chaude, l'aération et l'ensemble des appareils électriques et de l'éclairage sont couvertes par un système d'autoproduction énergétique basé sur les énergies renouvelables.

Chapitre II : GENERALITES SUR L'EFFICACITE ENERGETIQUE DANS LE BATIMENT

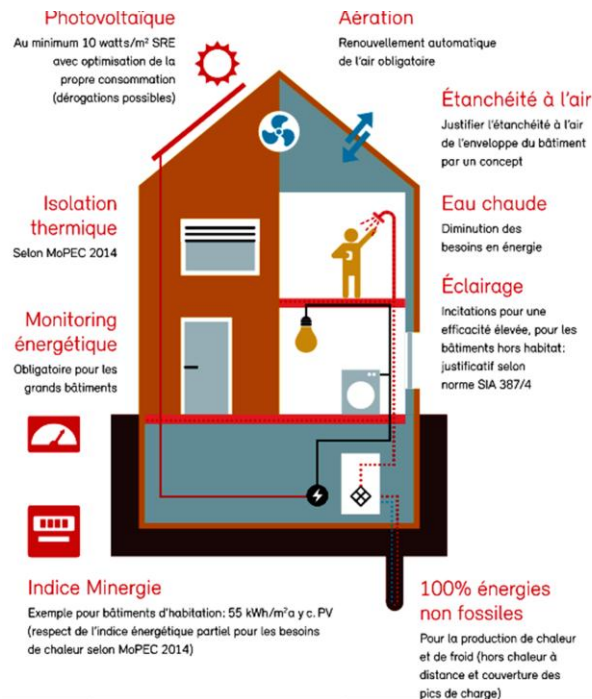


Figure 2.6 Les principes du bâtiment Minergie® (Minergie, 2018).

❖ LES EXIGENCES REGLEMENTAIRES FRANÇAISES POUR LA CONSTRUCTION DES BATIMENTS :

La construction de bâtiments neufs est identifiée comme un levier d'action crucial, avec une valeur cible moyenne de 50 kWhep/ (m².an) établie par le label BBC (bâtiments basse consommation) devenu la norme pour les nouvelles constructions en France. La loi de transition énergétique pour la croissance verte, vise à généraliser les bâtiments à énergie positive et à promouvoir des constructions à faible empreinte carbone tout au long de leur cycle de vie, en introduisant le label Energie Positive et Réduction Carbone « E⁺C⁻ » (Ministère de la Transition écologique et solidaire, 2017). Les objectifs de la Règlementation thermique 2012 (Grenelle Environnement, 2010) visent à :

- Consommation d'énergie primaire inférieure à 50 kWh/m²/an en moyenne.
- Modulation de l'exigence de consommation en fonction des émissions de gaz à effet de serre des bâtiments.
- Modulation de l'exigence de critères techniques (localisation géographique, des caractéristiques et de l'usage des bâtiments).
- Afin de garantir la qualité de conception énergétique du bâti, définition additionnelle d'un seuil ambitieux de besoin maximal en énergie de chauffage des bâtiments.

Chapitre II : GENERALITES SUR L'EFFICACITE ENERGETIQUE DANS LE BATIMENT

La RT2012 comporte trois exigences de résultats et quelques exigences de moyens. (Ministère de la Transition écologique et solidaire 2016) :

✓ Exigence d'efficacité énergétique minimale du bâti, le besoin bioclimatique ou « Bbiomax » : elle impose une limitation simultanée du besoin en énergie pour les composantes liées à la conception du bâti (chauffage, climatisation et l'éclairage). Un Bbio performant s'obtient en optimisant le bâtiment indépendamment des systèmes énergétiques mis en œuvre par une conception bioclimatique réfléchie (Fig. 2.7) en travaillant sur :

- l'orientation et la disposition des baies afin de favoriser les apports solaires en hiver tout en s'en protégeant en été,
- Privilégier l'éclairage naturel.
- Prendre en compte l'inertie pour le confort d'été,
- Limiter les déperditions thermiques grâce : à la compacité des volumes, et une bonne isolation des parois opaques (murs, dalle et toiture) et des baies (fenêtres et portes donnant sur l'extérieur ou sur un local non chauffé).

Le Bbio d'une construction n'a pas d'unité, il devra être inférieur au Bbio max qui est défini selon la zone climatique, l'altitude et la surface du bâtiment : $BBIO_{MAX} = BBIO_{MAX MOYEN} \cdot (M_{GEO} + M_{BALT} + M_{BSURF})$.

$BBIO_{MAX MOYEN}$: Valeur moyenne du BBIOMAX définie par type d'occupation ou de parties de bâtiments et par catégories CE1 ou CE2.

M_{GEO} : Coefficient de modulation suivant la zone géographique

M_{BALT} : Coefficient de modulation suivant l'altitude

Chapitre II : GENERALITES SUR L'EFFICACITE ENERGETIQUE DANS LE BATIMENT

M_{BSURF} : Pour les maisons individuelles ou accolées, coefficient de modulation selon la surface moyenne des logements du bâtiment.

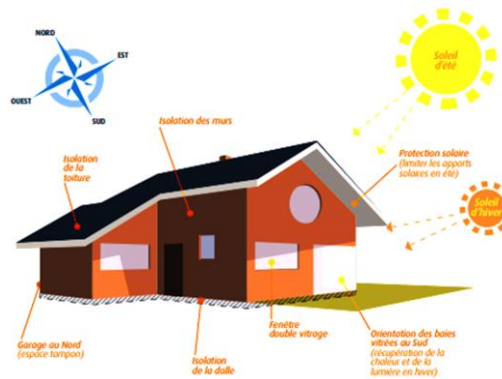


Figure 2.7 Quelques principes importants de conception permettant de répondre à l'exigence du Bbio. Source (Ministère de l'égalité des territoires et du logement, Ministère de l'écologie, du développement durable et de l'énergie 2013)

✓ Exigence de la consommation énergétique du bâtiment « Cepmax » : elle se traduit par le coefficient de Consommation conventionnelle d'énergie primaire porte sur les consommations annuelles de cinq usages suivants : chauffage, climatisation, eau chaude sanitaire, éclairage, et auxiliaires tels que les pompes et les ventilateurs.

la valeur du Cepmax, fixée à 50 kWhEP/ (m².an) d'énergie primaire en moyenne pour les bâtiments. Cette valeur est ajustée en fonction de divers paramètres tels que la localisation géographique, l'altitude, le type d'usage du bâtiment, la surface moyenne des logements et les émissions de gaz à effet de serre. Des ajustements spécifiques sont effectués pour les sources d'énergie telles que le bois et les réseaux de chaleur à faible émission de CO₂.

Le résultat final du Cep dépend des conditions réelles d'utilisation, notamment le mode d'entretien des équipements et le comportement des usagers. Cependant, il est complexe de déterminer le niveau réel de consommation du bâtiment en raison de son lien avec d'autres usages énergétiques, comme les équipements multimédias et bureautiques.

Il est souligné que le Cep obtenu doit être inférieur au Cepmax, et cette valeur peut varier en fonction de facteurs tels que la taille du bâtiment, la zone climatique, l'utilisation de systèmes de production d'énergie par biomasse, et l'installation de panneaux photovoltaïques.

✓ Exigence de confort en été «Tic » : il s'agit de la Température intérieure conventionnelle au cours d'une séquence de 5 jours très chauds d'été. La limitation de la

Chapitre II : GENERALITES SUR L'EFFICACITE ENERGETIQUE DANS LE BATIMENT

température intérieure vise à assurer un bon niveau de confort en été sans avoir à recourir à un système actif de refroidissement. La température intérieure atteinte en été (T_{ic}) pendant 5 jours doit être inférieure à la température intérieure conventionnelle de référence.

✓ Les exigences de moyens : Lors de la conception du bâtiment et de l'exécution des travaux, certains principes sont obligatoires :

✓ Pour assurer une qualité de mise en œuvre optimale, il est recommandé de prévoir un système de ventilation performant, qu'il soit simple flux ou double flux. La perméabilité à l'air des logements doit être limitée à $0,6 \text{ m}^3 / (\text{m}^2 \cdot \text{h})$ pour les maisons individuelles ou accolées, et à $1 \text{ m}^3 / (\text{m}^2 \cdot \text{h})$ pour les logements collectifs. Il est également essentiel de traiter efficacement les ponts thermiques, par exemple en assurant la continuité de l'isolant à la jonction plancher/mur en cas d'isolation par l'intérieur. En outre, le traitement de l'étanchéité à l'air doit être vérifié par un test de la "porte soufflante", une mesure obligatoire dans le cadre des logements collectifs.

✓ Pour assurer un confort optimal dans l'habitation, il est recommandé de prévoir une surface totale des baies équivalente à au moins $1/6$ de la surface habitable. De plus, la mise en place d'une protection solaire mobile dans les chambres, telle que des volets ou des stores extérieurs, est conseillée. Il est également essentiel que la transmission thermique entre une zone chauffée et une zone non chauffée ne dépasse pas $0,36 \text{ W} / (\text{m}^2 \cdot \text{K})$ en moyenne.

✓ Pour stimuler le développement des énergies renouvelables, il est préconisé d'opter pour plusieurs solutions, dont l'installation de capteurs solaires thermiques d'au moins 2 m^2 , le raccordement à des réseaux de chaleur alimentés majoritairement par des sources d'énergie renouvelable ou de récupération, l'adoption d'appareils électriques de production d'eau chaude sanitaire thermodynamiques répondant à la norme NF EN 16147 avec un coefficient de performance (COP) supérieur à 2. De plus, il est recommandé d'assurer la production de chauffage et/ou d'eau chaude sanitaire par une chaudière à micro-cogénération utilisant des combustibles liquides ou gazeux, de contribuer avec au moins $5 \text{ kWh} / (\text{m}^2 \cdot \text{an})$ en énergies renouvelables, et d'utiliser des poêles à bois/granulés, des chaudières à bois, ainsi que des pompes à chaleur.

✓ Pour optimiser l'utilisation d'un bâtiment, il est essentiel de mettre en place un dispositif de mesure ou d'estimation des diverses consommations d'énergie, tout en fournissant des informations adéquates aux occupants.

✓ Pour assurer une qualité énergétique globale, il est important de ne pas considérer la production locale d'énergie au-delà de l'autoconsommation.

Chapitre II : GENERALITES SUR L'EFFICACITE ENERGETIQUE DANS LE BATIMENT

Les obligations dans le cadre du permis de construire : Pour l'amélioration de la performance énergétique des bâtiments neufs, le Grenelle environnement prévoit un dispositif qui se traduit par la réalisation de deux documents à établir à deux moments clés du processus de construction : au dépôt de la demande de permis de construire et à l'achèvement des travaux de construction d'un bâtiment

-Attestation à établir au dépôt de la demande de permis de construire :

L'attestation demandée inclut des informations administratives (Ministère de l'égalité des territoires et du logement, Ministère de l'écologie, du développement durable et de l'énergie 2013) :et liées à l'étude thermique, comprenant la surface hors œuvre nette (SHONRT) et la surface habitable (Shab) du bâtiment. Elle spécifie la valeur du Bbio de l'habitation et la valeur du Bbiomax en tant qu'exigence de résultat, ainsi que des exigences de moyens telles que la surface des baies (y compris les portes) en m², vérifiant qu'elle est supérieure à 1/6 de la Shab. De plus, elle requiert l'indication du recours à une source d'énergie renouvelable ou à des solutions alternatives. Ces informations sont définies par les Ministères de l'Égalité des Territoires et du Logement, ainsi que de l'Écologie, du Développement Durable et de l'Énergie en 2013.

-Attestation à établir à l'achèvement des travaux :

Il s'agit d'un document, établi par un professionnel qualifié tel qu'un contrôleur technique, architecte, diagnostiqueur agréé pour le diagnostic de performance énergétique (DPE), ou un organisme certificateur agréé par l'État, atteste la conformité à la réglementation thermique. Il vérifie les trois exigences de résultats de la RT 2012 (besoin bioclimatique, consommation d'énergie primaire, confort d'été) et assure la cohérence entre l'étude thermique réalisée et le bâtiment construit. Cela inclut des points clés tels que la production d'énergie, l'étanchéité à l'air, l'utilisation d'énergies renouvelables, et l'isolation, avec des contrôles visuels sur site ou sur des documents. Ces directives sont émises par le Ministère de la Transition écologique et solidaire en 2014.

Chapitre II : GENERALITES SUR L'EFFICACITE ENERGETIQUE DANS LE BATIMENT

-Le contrôle de l'application de la RT 2012 :

Le contrôle de l'application de la RT 2012 comprend des Contrôles des Règles de Construction (CRC) effectués annuellement sur un échantillon de nouvelles constructions. L'objectif est de sensibiliser les acteurs impliqués au respect des règlements, des bonnes pratiques professionnelles, et à une meilleure qualité des bâtiments. Les améliorations incluent l'introduction d'une attestation de prise en compte de la RT 2012 lors de la demande de permis de construire et à l'achèvement du bâtiment. De plus, les logiciels génèrent un récapitulatif standardisé d'étude thermique, bénéfique pour le maître d'œuvre, le maître d'ouvrage, le diagnostiqueur, et l'agent assermenté de l'État en charge des CRC.

❖ Maisons Zéro Énergie :

Ce programme, proposé par le ministre de l'énergie du Département de l'Énergie des États-Unis (DOE), définit la maison à zéro énergie comme un bâtiment produisant autant ou plus d'énergie qu'il n'en consomme. Il s'agit d'une combinaison entre le concept de bâtiment passif et l'utilisation de sources d'énergies renouvelables telles que les toits solaires photovoltaïques et thermiques. Ces derniers garantissent la totalité de la consommation énergétique nécessaire pour le chauffage, le rafraîchissement et l'électricité. En conséquence, ce type de bâtiment présente un bilan net de consommation d'énergie nul vis-à-vis du fournisseur d'énergie (CHLELA, 2008) (Hannachi-Belkadi, 2008) (Stéphane THIERS, 2008).

Les objectifs de ce programme sont les suivants (ADEME-PUCA-CSTB, 2007) :

- Production de bâtiment consommant 30 à 90% d'énergie en moins pour le neuf et 20 à 30% de moins pour l'existant
 - Intégration de systèmes de production décentralisés afin d'arriver en 2020 à des bâtiments zéro énergie,
 - Soutien aux entreprises pour réduire les temps de construction et les déchets,
 - Amélioration de la productivité des entreprises,
 - Développement de nouvelles opportunités de marché pour les industriels et les distributeurs.

D'autres pays ont mis en œuvre le concept de "Zéro Energy Home", tels que le Canada, le Japon, l'Allemagne et la Nouvelle-Zélande. Ils se fondent sur le même principe visant à minimiser les besoins en chauffage, en refroidissement et en électricité grâce à une

Chapitre II : GENERALITES SUR L'EFFICACITE ENERGETIQUE DANS LE BATIMENT

conception efficace de l'enveloppe et à l'utilisation d'équipements performants et économes en énergie, combinés à une source d'énergie renouvelable.

b) Les approches plus larges pour l'évaluation de la performance des bâtiments :

D'autres approches, telles que les systèmes d'évaluation environnementale du bâtiment, s'inscrivent dans une démarche globale qui prend en compte l'interaction entre la conception, la construction et l'occupation du bâtiment sur l'environnement, ainsi que sur les ressources et la santé. Ces systèmes ne se cantonnent pas uniquement à la dimension de la performance énergétique, qui représente l'une des exigences nécessaires pour obtenir la certification du label.

La performance du bâtiment en matière d'économie d'énergie a été intégrée sous forme d'une catégorie dans le processus d'évaluation des systèmes de certifications tels que le BREEAM, le LEED et le CASBEE.

Les systèmes d'évaluation environnementale du bâtiment, tels que BREEAM, LEED et CASBEE, ont pour objectif d'améliorer la performance environnementale des constructions en mettant l'accent sur divers aspects tels que la consommation d'énergie, l'isolation thermique, la qualité de l'air, la lumière, le bruit, la consommation de matériaux et l'eau potable (Burnett, 2007). Les critères d'évaluation sont définis par la réglementation du label (Kibert, 2016). En outre, l'évaluation de la durabilité englobe des exigences au-delà de l'efficacité énergétique, notamment la relation du bâtiment avec son environnement, les matériaux utilisés, l'utilisation de l'eau et des eaux usées, la qualité de l'air intérieur et l'élimination des substances toxiques dans les produits de finition (Kuppaswamy, 2015).

L'évaluation de l'efficacité environnementale des bâtiments a progressé depuis la création du premier système d'évaluation, le BREEAM. Depuis, plusieurs systèmes ont été proposés à l'échelle internationale, comme illustré dans la Figure 2.8.

Chapitre II : GENERALITES SUR L'EFFICACITE ENERGETIQUE DANS LE BATIMENT

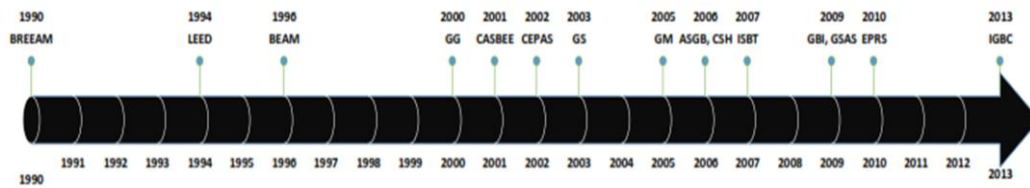


Figure 2.8 Chronologie des systèmes d'évaluation environnementale du bâtiment les plus répandus, source (Shan et al, 2018).

❖ Le label BREEAM (Building Research Establishment's Environmental Assessment Method):

Développé par le « BRE » au Royaume-Uni dans les années 1990, le BREEAM est une méthode d'évaluation environnementale appliquée aux bâtiments neufs et existants. Utilisé dans 77 pays, avec plus de 564,276 projets certifiés BREEAM et environ 2,272, 434 bâtiments enregistrés pour évaluation et certification (BRE, 2018), le BREEAM évalue la performance des bâtiments à travers dix catégories attribuant des crédits (BRE, 2018). Les points cumulés dans chaque catégorie déterminent la classification du projet parmi cinq niveaux : « Passable, Bon, Très Bon, Excellent ou Exceptionnel ».

Les dix catégories couvrent la gestion, le bien-être et la santé, l'énergie, le transport, les matériaux, l'eau, les déchets, le paysage et l'écologie, la pollution, et l'innovation. Le BREEAM peut être utilisé pour évaluer différents types de projets, notamment nouvelle construction, réhabilitation majeure, extension de bâtiments existants, combinaison de nouvelles constructions et de rénovations majeures, ainsi que des projets liés à des bâtiments à grande consommation.

❖ Le label LEED "Leadership in Energy and Environmental Design" (ÉTATS-UNIS):

LEED (Leadership in Energy and Environmental Design) est un programme de certification et d'évaluation visant la conception, la construction et l'exploitation de bâtiments durables à haute performance (U.S. Green Building Council, 2018). Initié par l'organisation américaine USGBC, ce programme vise à transformer l'approche de la construction vers une perspective environnementale, améliorant ainsi la qualité de vie dans des espaces sains, efficaces et économiques (US Green Building Council). La certification LEED est reconnue mondialement comme un symbole de durabilité.

Chapitre II : GENERALITES SUR L'EFFICACITE ENERGETIQUE DANS LE BATIMENT

Le système LEED s'applique à une variété de projets de construction, tant pour les bâtiments existants que pour les nouveaux, couvrant des domaines tels que les nouvelles constructions, les rénovations majeures, l'enveloppe extérieure, l'intérieur des centres commerciaux, les écoles, les lieux de soin et de santé, le détail, les bâtiments existants (opérations et maintenance), les maisons, et le développement du quartier.

Ce label repose sur un système de notation comprenant plusieurs catégories, notamment le site de construction, l'efficacité de l'eau, l'énergie et l'atmosphère, les matériaux et les ressources, la qualité de l'environnement intérieur, et l'innovation dans la conception. En fonction du nombre de points accumulés, un projet peut obtenir l'un des quatre niveaux de classement LEED : Certifié (40-49 points), Argent (50-59 points), Or (60-79 points), ou Platine (plus de 80 points) (U.S. Green Building Council, 2018).

❖ Le label CASBEE «Comprehensive Assessment System for Building Environmental Efficiency" (JAPON):

Il s'agit d'une méthode d'évaluation et de notation de la performance environnementale des bâtiments et de l'environnement bâti. Cette approche vise une évaluation complète de la qualité d'un bâtiment en prenant en compte le confort intérieur, l'esthétique, et les pratiques environnementales, notamment l'utilisation de matériaux et d'équipements économes en énergie et à faible impact environnemental (JSBC and IBE, 2016). CASBEE a été développé par un comité de recherche créé en 2001 dans le cadre d'un projet industriel/gouvernemental/académique.

L'évaluation CASBEE se classe en cinq catégories : supérieure (S), très bonne (A), bonne (B+), légèrement médiocre (B-) et médiocre (C). Les outils d'évaluation CASBEE reposent sur trois principes :

Évaluation complète du bâtiment tout au long du cycle de vie.

Évaluation de la qualité du milieu bâti (Q) et de la charge environnementale (L) en tant que cibles majeures de l'évaluation.

Définition de la limite spatiale et évaluation basée sur le calcul de l'indice de l'efficacité de l'environnement bâti (EBE), où, étant donné L et Q, BEE est défini comme Q/L pour indiquer le résultat global de l'évaluation environnementale CASBEE des bâtiments (voir la Figure 2.9).

Chapitre II : GENERALITES SUR L'EFFICACITE ENERGETIQUE DANS LE BATIMENT

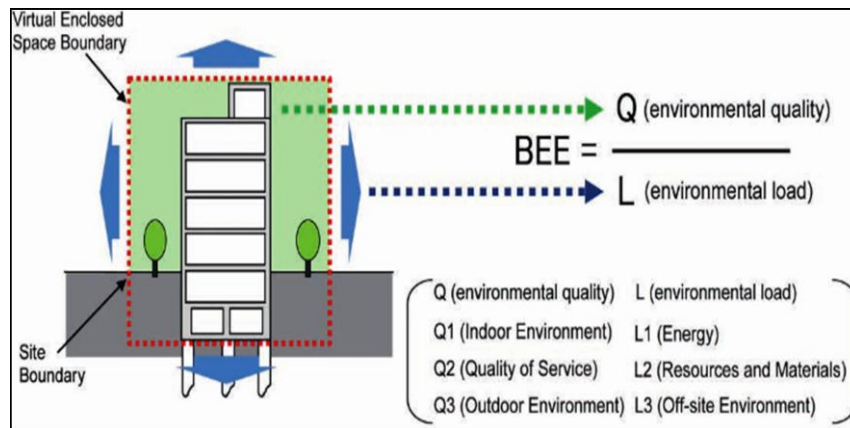


Figure 2.9 La définition de la limite spatiale pour l'évaluation CASBEE, et le diagramme BEE. Source (IBEC, 2016).

Évaluation des émissions de LCCO₂ par CASBEE : CASBEE intègre l'évaluation du cycle de vie du CO₂ (LCCO₂), mesurant les émissions de CO₂ tout au long de la vie du bâtiment. Une nouvelle méthode de "calcul standard" offre une estimation simplifiée de LCCO₂ en se basant sur les données déjà présentes dans la feuille de calcul CASBEE. La performance de LCCO₂ est précisément notée avec 1 à 5 étoiles vertes, alignées sur l'évaluation BEE existante (voir la Figure 2.10).

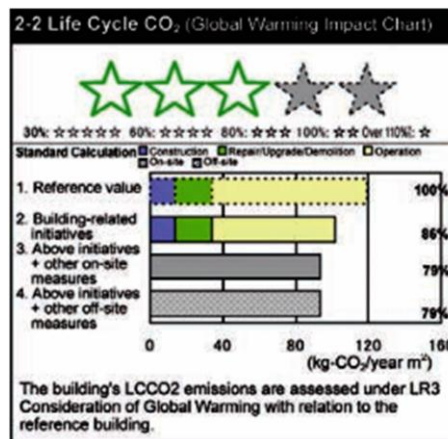


Figure 2.10 Classement de l'impact du réchauffement climatique par l'évaluation des émissions de CO₂ du cycle de vie avec CASBEE. Source (IBEC, 2016).

Les outils d'évaluation CASBEE sont conçus pour différentes échelles, allant de la construction individuelle (maisons et bâtiments) à l'urbanisme (aménagement urbain) et à la gestion de la ville. La Figure 2.11 illustre cette diversité. CASBEE-Housing et CASBEE-Building évaluent la performance environnementale des maisons individuelles et des bâtiments, tandis que CASBEE-Urban Development est dédié à l'évaluation environnementale des blocs urbains et du développement urbain. Enfin, CASBEE-City

Chapitre II : GENERALITES SUR L'EFFICACITE ENERGETIQUE DANS LE BATIMENT

évalue la performance environnementale à l'échelle du gouvernement local. Toutes ces évaluations sont basées sur les indicateurs BEE de CASBEE.

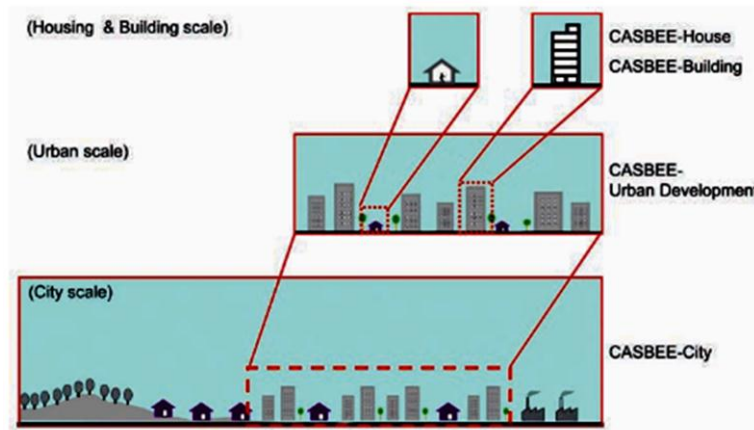


Figure 2.11. Structure stratifiée d'une zone définie pour l'évaluation CASBEE. Source (JSBC and IBE, 2016).

Synthèse :

Les outils d'évaluation environnementale des bâtiments varient considérablement, permettant l'évaluation de divers types de constructions. Toutefois, ils couvrent différemment le cycle de vie de la construction en se basant sur des directives et des bases de données distinctes, distribuant ainsi différents labels et certificats. De plus, les facteurs culturels et les réglementations propres à chaque pays ont une influence (Appu Haapio et al. 2008). Par exemple, le système CASBEE se concentre sur l'analyse du bâtiment lui-même et sur des critères tels que l'efficacité de l'eau et des matériaux, tandis que les systèmes BREEM et LEED accordent plus d'importance au critère du transport que ceux précédemment cités (Noriko AOTAKE et al. 2005).

Ces systèmes cités ci-dessus visent à améliorer la qualité environnementale des bâtiments. Quelques systèmes ABE, comme le CASBEE du Japon, adoptent la mesure de l'analyse du cycle de vie du CO₂ du bâtiment afin de réduire l'empreinte carbone des constructions.

Les systèmes d'évaluation du bâtiment durable les plus dominants offrent une variété de versions spécifiques en termes de type de structure (tels que les systèmes : CASBEE, BREEAM, BEAM, EPRS, GG) et des versions en termes de la phase du projet (comme pour les systèmes : LEED, CEPAS, GS).

Pour les systèmes d'évaluation du bâtiment durable, sept critères d'évaluation sont considérés comme essentiels : le principal critère pour évaluer le bâtiment vert est en

Chapitre II : GENERALITES SUR L'EFFICACITE ENERGETIQUE DANS LE BATIMENT

premier lieu "l'énergie", suivi du "site", de "l'environnement intérieur", du "sol et de l'environnement extérieur", des "matériaux", de "l'eau" et de "l'innovation" (Shan, Ming et al. 2018). Majoritairement, le système de notation hiérarchique le plus répandu se base sur quatre niveaux de certification du bâtiment durable.

Conclusion :

Pour réduire la consommation énergétique des bâtiments et atteindre des conditions de confort thermique optimales, différentes approches sont employées, notamment les techniques d'architecture bioclimatique, des solutions visant à diminuer les besoins énergétiques et à gérer les apports gratuits, ainsi que d'autres techniques passives et actives.

Face aux conséquences du changement climatique découlant d'une consommation énergétique élevée, des exigences en matière de performances énergétiques des bâtiments ont été établies à travers divers labels et réglementations. Les systèmes d'évaluation internationaux des bâtiments ont également pris des mesures pour garantir à la fois l'efficacité énergétique et la réduction de l'impact environnemental des bâtiments, étant donné que ces derniers représentent une opportunité majeure de réduire les émissions de gaz à effet de serre.

Il apparaît de manière évidente qu'un bâtiment énergétiquement efficace, fiable et résilient est un bâtiment à faibles émissions de carbone. Un bâtiment à zéro carbone intègre de manière cohérente les principes de conception des stratégies passives et actives, assurant ainsi l'efficacité énergétique tout en utilisant des sources d'énergie renouvelable pour produire sur place l'énergie nécessaire au bâtiment, aboutissant à un bilan annuel quasi nul.

**CHAPITRE III : LE CONFORT THERMIQUE EN CLIMAT
TEMPERE MEDITERRANEEN**

Introduction

La performance énergétique des bâtiments et le confort thermique peuvent être améliorés grâce à l'application des techniques traditionnelles, à l'utilisation de l'architecture vernaculaire et à l'adoption des stratégies bioclimatiques.

Ce chapitre s'attache à explorer les facettes essentielles liées au climat, mettant en lumière d'abord les notions fondamentales relatives au climat méditerranéen, pour ensuite se pencher sur les aspects cruciaux du confort thermique et les approches d'évaluation dans ce contexte particulier.

La dernière partie aborde les principes de d'architecture vernaculaire et les techniques de construction développées localement au fil du temps, en réponse aux conditions climatiques pour assurer le confort au sein des habitations.

3.1 Le climat et les conditions climatiques :

Parmi les divers facteurs qui affectent la conception architecturale, le climat est de première importance pour maintenir les conditions confortables dans le bâtiment (Vural, 2007).

3.1.1 Les paramètre du climat :

La connaissance des spécificités du climat de la région est nécessaire avant d'utiliser et d'intégrer à l'environnement, et la construction du bâtiment devra s'adapter à chaque situation. Les paramètres et les conditions climatiques varient selon la situation géographique de la région, les cycles saisonniers, la latitude et l'altitude (Dutreix, 2010). En outre les éléments du climat, principalement : la température ambiante, l'hygrométrie, le vent, le rayonnement thermique ambiant et l'activité de l'homme influencent le confort de l'être humain.

a) L'ensoleillement :

Le soleil constitue une source permanence d'énergie nécessaire pour l'humanité sur terre, il émet une énergie sous forme d'un rayonnement électromagnétique. Au cours de la traversée de l'atmosphère, une partie du rayonnement solaire est absorbée et réfléchi essentiellement par les gaz, et les microgouttelettes d'eau. L'autre partie est diffusée par les molécules, les poussières, les aérosols. Le rayonnement solaire global provenant au sol se décompose en deux : le rayonnement direct provenant directement du soleil et le rayonnement diffus (voir Fig. 3.1).

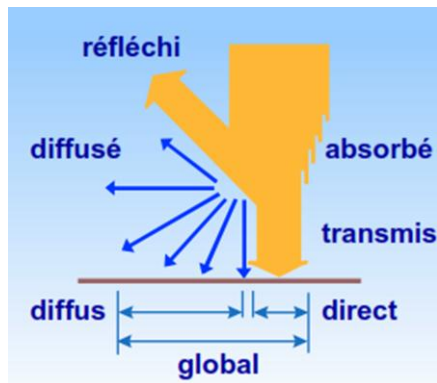


Figure 3. 1. Composition du rayonnement solaire. Source (Liébard, 2005).

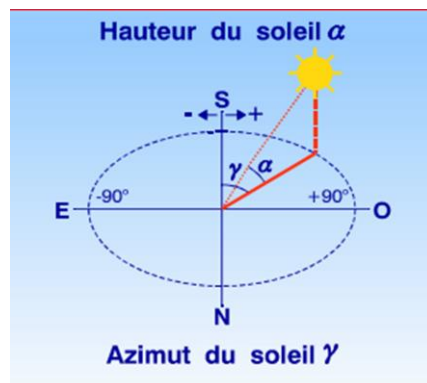


Figure 3. 2. Coordonnées solaires. Source (Liébard, 2005)

Le système solaire est à l'origine des variations saisonnières et affecte les températures et l'ensoleillement. Le soleil suit une cours dont chaque point est déterminé par sa hauteur angulaire et son azimut (voir Fig. 3.2).

Cette hauteur varie selon la saison, en été le soleil se lève au nord-est à plus de 60° à midi puis il redescend vers le nord-ouest, durant cette saison il faut prévenir des masques et les protections solaires sur les façades sud, façade est et ouest. En hiver, il se lève au sud-est au-dessus de l'horizon sud à moins de 30° puis il redescend vers le sud-ouest, durant cette saison seulement le mur sud d'une construction reçoit le soleil (Armand, 2010) .

D'autres facteurs peuvent influencer l'ensoleillement : les caractéristiques climatiques telles : le relief et les masse d'eau, la nébulosité. Le rayonnement solaire est peut être réduit par les masse d'eau à travers l'évaporation et formation des nuages, et par la nébulosité soit la nébulosité artificiel causé par la pollution, ou bien le profil de nébulosité caractérisé par le type du ciel.

-Le rayonnement électromagnétique :

Le soleil apporte au bâtiment l'énergie et la lumière par des rayonnements électromagnétiques qui se caractérisent par leur vitesse, leur fréquence et leur longueur d'onde λ , selon la longueur d'onde des rayons le spectre solaire se répartit selon trois types de rayonnement :

Les ultraviolets (UVA et UVB) d'une longueur d'onde comprise entre 280 et 380 nm, la partie visible du spectre dont le rayonnement solaire compris entre 380 et 700 nm, les rayons infrarouges (IRA et IRB) qui correspondent aux longueurs d'ondes comprises entre 700 et 2500 nm, voir la figure 3.3 (Bodart, 2002).

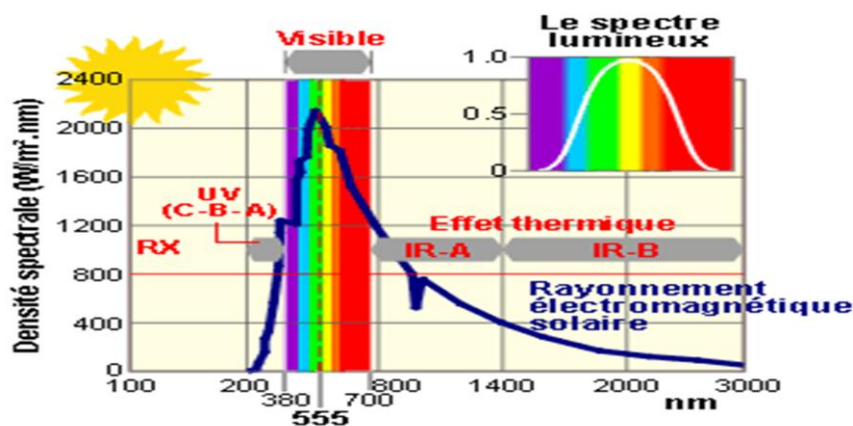


Figure 3. 3 Le spectre solaire. (Source : Bodart ,2002).

Le transfert de chaleur à travers une fenêtre vitrée :

Le transfert de chaleur au travers d'une fenêtre s'effectue selon trois mécanismes (voir Fig. 3.4): la conduction, la convection et la radiation, ces modes constituent les principes de base pour développer des vitrages plus performants utilisés dans le domaine du bâtiment (Bodart 2002; Olissan 2017):

La conduction : est un transfert direct au sein d'un milieu matériel dont la propagation de la chaleur se produit en cas d'un contact physique direct entre deux corps par une interaction moléculaire. Les molécules de la zone chaude se heurtent vivement entre elles et transmettent leur énergie de vibration aux molécules de la zone froide.

La convection : est l'échange de chaleur entre une surface et un fluide mobile (eau, gaz) à son contact, la chaleur se déplace du secteur chaud vers le secteur froid.

Lorsque les molécules d'un fluide froid, tel que l'eau ou l'air, viennent au contact d'une paroi chaude, une partie de l'énergie de vibration animant les molécules superficielles du solide se communique aux molécules voisines du fluide.

Chapitre III : LE CONFORT THERMIQUE EN CLIMAT TEMPERE MEDITERRANEEN

Le rayonnement : est l'échange thermique qui se produit entre deux corps à température différentes par émission et absorption de radiations électromagnétiques (de différentes valeurs d'onde).

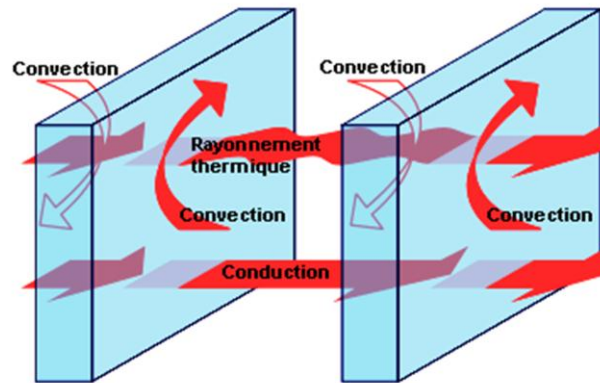


Figure 3. 4 Les modes de transfert de chaleur. (Source : Architecture et Climat, 2021).

b) Température :

La température dépend essentiellement du rayonnement solaire, du vent, de l'altitude et du sol. Le rayonnement solaire, une source de chaleur, est absorbé par la terre et l'atmosphère. La propagation de cette chaleur se réalise par conduction ou par diffusion, résultant des turbulences créées par le vent. La température est directement corrélée à l'intensité du rayonnement solaire, augmentant davantage lorsque le rayonnement direct est important.

La température ressentie dans le bâtiment :

Pour le bien-être de l'être humain, la température ambiante doit être maintenue à environ 24 °C. C'est pourquoi la construction d'un espace habitable doit prendre en compte la différence entre la température intérieure et extérieure tant en été qu'en hiver. La température ressentie résulte de la moyenne entre la température ambiante de l'air et la température radiante transmise par rayonnement. La combinaison de ces deux valeurs (température radiante + ambiante) permet d'obtenir une sensation de confort pour le corps humain. Les plages de température ressentie supportable (mais pas nécessairement agréable) se situent généralement entre 14 °C en hiver et 27 °C en été.

c) L'humidité relative ou l'hydrothermie :

La Méditerranée fonctionne comme un vaste bassin d'évaporation, enrichissant ainsi l'humidité dans l'atmosphère. Les précipitations sur les terres bordières (Trzpit ,1980) et les régions en bordure de la Méditerranée se caractérisent par un taux d'humidité élevé.

Chapitre III : LE CONFORT THERMIQUE EN CLIMAT TEMPERE MEDITERRANEEN

Il est important de noter que l'air est composé de constituants permanents appelés "air sec" et de constituants variables, principalement l'humidité ou la vapeur d'eau, qui varie en fonction du temps et du lieu. L'humidité relative est le rapport, exprimé en pourcentage, entre la quantité d'eau contenue dans l'air à la température ambiante (l'humidité absolue) et la quantité maximale que ce volume peut contenir à la même température (l'humidité absolue de saturation) (Trzpit 1980 ; Liébard 2005). Cependant, le terme "air humide" est utilisé lorsque l'humidité joue un rôle important et lorsque son influence est étudiée.

Il existe une relation entre la température et l'humidité de saturation. La teneur en vapeur de saturation augmente considérablement avec la température de l'air. Plus l'air est chaud, plus il est capable de contenir de la vapeur d'eau.

Une humidité relative comprise entre 30% et 70% présente peu de désagréments. Si l'HR est inférieure à 30%, l'air est trop sec, favorisant l'augmentation de la concentration en poussières dans l'air, l'augmentation de l'électricité statique et le dessèchement des muqueuses.

Lorsque l'HR est supérieure à 70%, il y a une croissance microbienne importante et une condensation sur les surfaces froides. En cas d'air humide dans un climat estival méditerranéen, avec une humidité relative dépassant 80% et une atmosphère saturée, la transpiration de la peau ne s'évapore pas. La solution consiste à accélérer la ventilation, bien que cela soit supportable si la température n'est pas élevée.

d) Les précipitations :

C'est l'apport d'eau parvenant à la surface de la terre par la condensation de la vapeur d'eau atmosphérique, se manifestant sous forme liquide (pluie ou rosée) ou sous forme solide (neige ou grêle). Cela résulte du processus fondamental du cycle de l'eau. Le taux de pluviométrie varie d'une région à l'autre ; dans les régions équatoriales et tropicales, les précipitations sont plus abondantes que dans les régions désertiques. Au niveau des océans sous un climat tropical, environ 385 000 km³ d'eau sont reçus chaque année, tandis que les continents reçoivent près de 111 000 km³ tout au long de l'année.

La protection contre la pluie a été l'un des objectifs de la construction au fil du temps. Cependant, il s'agit également d'une ressource indispensable à valoriser dans le domaine de la construction (Dutreix, 2010).

e) Le vent :

Il s'agit d'un déplacement horizontal de l'air généré par les différences de pression entre les masses d'air : l'air s'écoule des zones de hautes pressions (anticyclone) vers les zones de basses pressions (dépression) dans l'hémisphère Nord (Izard, 1979). L'écoulement n'est pas rectiligne, mais prend une forme en "S" en raison de la force de Coriolis, comme illustré dans la figure 3.5.

Il existe trois grandes familles de vents : les vents dominants, observables sur plusieurs centaines de kilomètres, fluctuent sur des périodes de l'ordre d'une journée (Bozonnet, 2005) ; les vents saisonniers, soufflant en fonction des différences de pression estivales et hivernales entre les masses d'air au-dessus des continents et des océans ; et le troisième type, les vents locaux, qui sont produits par des caractéristiques géographiques locales, tels que les brises terre/mer.

La vitesse du vent est variable et évolue en fonction de l'altitude. De plus, la nature, la topographie et la taille des aspérités du terrain, qui constituent des rugosités variables, peuvent influencer le régime du vent, comme présenté dans la figure 3.4. La distribution et la direction des vents en un lieu sont représentées par la rose des vents.

En ambiance humide, le vent constitue un moyen de rafraîchissement en été. Cependant, en hiver, il peut causer des déperditions thermiques et un refroidissement par conduction. Il est important de favoriser la ventilation naturelle en été tout en évitant l'exposition aux vents dominants d'hiver.

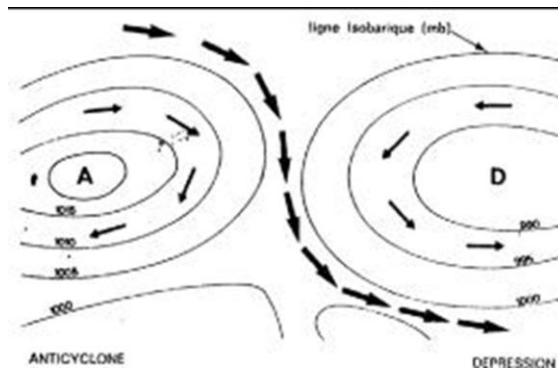


Figure 3. 5 Ecoulement du vent de L'Anticyclone (A) vers la Dépressions (D) (Izard, 1979).

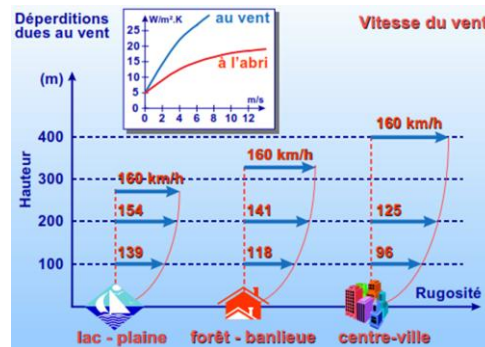


Figure 3. 6 Variation de la vitesse du vent selon la rugosité du site. (CHATELET ,1998 ; Liébard, 2005)

3.2 Les types du climat sur terre :

Selon la classification du Köppen-Geiger., Il y a cinq grand types du climat au niveau mondial : le climat tropical, le climat aride, le climat tempéré, le climat froid et polaire (Peel, 2007). Ces climat sont affinés en les subdivisant en sous catégories pour avoir 30 climat possible (voir fig. 3.7): trois types de climat tropical (ex ; Af : climat équatorial) quatre types du climat aride (ex ; BWh: climat désertique sec et chaud), neuf types du climat tempéré (ex ; Csa: climat tempéré chaud avec été sec (méditerranéen), douze du climat froid (ex ; Dw : climat continental froid avec hiver sec, et deux types du climat polaires (ex, ET: climat de toundra).

Le climat est repéré par un code de deux ou trois lettres : la 1^{ère} lettre représente le type du climat, la 2^{ème} lettre représente le régime pluviométrique, et la 3^{ème} lettre représente les variations de température (voir Annexe A).

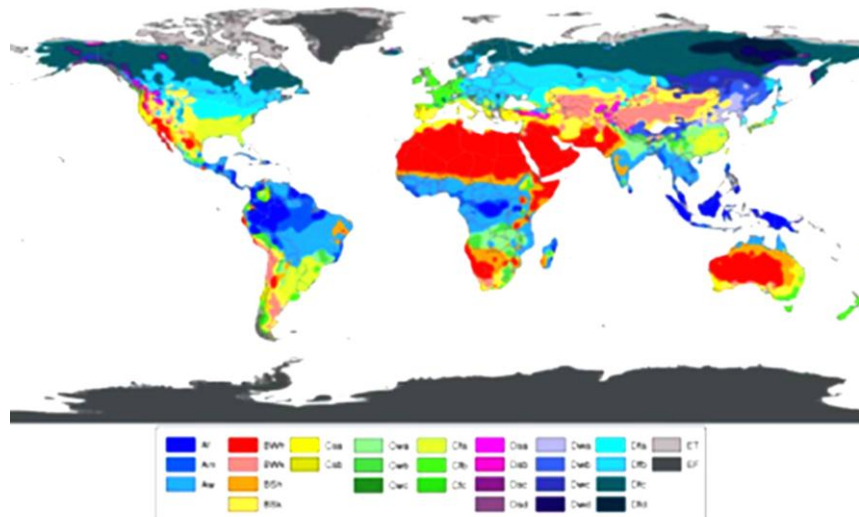


Figure 3. 7 La carte mondiale de la classification climatique Köppen-Geiger. Source (Peel, 2007)

3.2.1 Le climat Méditerranéen :

a) Caractéristiques du climat Méditerranéen :

La région méditerranéenne se caractérise par un climat estival chaud et sec, tandis que l'hiver est doux et humide.

Les étés sont chauds et secs, marqués par une sécheresse estivale, plus précisément par l'absence de pluie en été (bien que ces régions puissent être humides). La chaleur estivale est intense, avec des moyennes mensuelles élevées et des maxima absolus (à l'ombre) parfois supérieurs à ceux des pays tropicaux humides (par exemple, Alger 44 °C, Tunis 48 °C, Marrakech 49 °C). L'air chaud est chargé d'humidité, et avec la faible couverture nuageuse et la forte évaporation, la chaleur devient parfois insupportable (Tassin, 2012 ; Trzpit, 1980 ; Leroux, 2001).

Des hivers doux et humides caractérisent cette saison, avec des journées alternant entre le froid et la tiédeur. La température moyenne du mois le plus frais se situe entre 7 °C, comme à Marseille (7,1 °C), et 14-15 °C, comme à Beyrouth et Agadir (Tassin, 2012). Au nord de la Méditerranée, les périodes de froid peuvent abaisser les températures moyennes, mais les grands froids et les gelées sont modérés et exceptionnels, souvent se produisant moins de 10 jours par an. Cette douceur hivernale s'explique par l'inertie thermique des mers et des océans, l'ensoleillement intense, et le passage des perturbations apportant de l'air tiède sur le continent (Tassin, 2012).

Chapitre III : LE CONFORT THERMIQUE EN CLIMAT TEMPERE MEDITERRANEEN

Le climat méditerranéen se caractérise également par son régime pluviométrique. Les pluies surviennent pendant la période hivernale froide, avec des orages violents en début de saison. Le total annuel des précipitations est souvent inférieur à un mètre, par exemple, à Alger (680 mm) et à Rome (730 mm). Les valeurs augmentent près des rivages montagneux, tels que ceux du golfe de Gênes, du Rif et de la Kabylie, où les précipitations peuvent dépasser le mètre.

Selon Georges Viers, le climat méditerranéen est caractérisé par des moyennes mensuelles supérieures à +4 °C (limite d'hiver) et au moins une moyenne mensuelle supérieure à +15 °C (limite d'été). Selon Henri Gaussen, ce climat méditerranéen appartient au groupe des climats tempérés chauds, avec au moins un mois ayant une température moyenne inférieure à +15 °C et tous les mois avec une moyenne supérieure à 0 °C (Tassin, 2012), (Molinier, 1954; Bertrand, 1968; Trzpit, 1980; Leroux, 2001).

b) Délimitation du climat Méditerranéen :

Le domaine méditerranéen occupe une partie de la frange occidentale des continents, située entre 30° et 40° de latitude. La baie de Bougie (ville côtière de Bejaia) se trouve sur la bordure du bassin méditerranéen occidental dans la zone centrale de l'Algérie (Fig. 3.8). Cette ville présente un climat méditerranéen appartenant à la famille des climats tempérés, du type «Csa», c'est-à-dire un climat tempéré chaud avec un été sec (Peel, 2007).

Le climat méditerranéen est observé dans cinq régions du monde : sur les façades occidentales des continents autour de la Méditerranée (2 300 000 km²), en Californie (324 000 km²), dans le centre du Chili (140 000 km²), en Afrique du Sud (90 000 km²) et dans le sud de l'Australie (112 260 km²) (Tassin 2012).

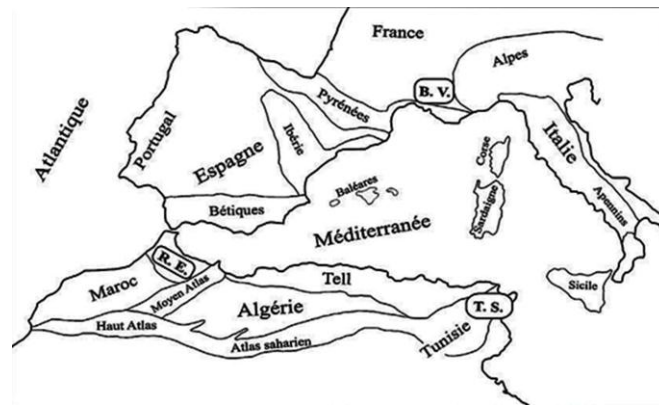


Figure 3. 8 Carte géographique de la Méditerranée occidentale (Aubouin , 1980) ; simplifiée et localisation des secteurs étudiés ; R.E. : Rif externe (Nord du Maroc), T.S. : Tunisie septentrionale ; B.V. : Bassin vocontien (SE de la France)

Sur le pourtour de la Méditerranée, la délimitation du climat méditerranéen repose sur les variations de température et la répartition des précipitations tout au long de l'année. Toutefois, le relief montagneux et sa disposition complexe rendent cette délimitation plus délicate. En Algérie, le climat méditerranéen évolue vers la semi-aridité et l'aridité, notamment sur les hauts plateaux (ou hautes plaines) qui bordent l'Atlas tellien (Tassin, 2012).

c) Situation bioclimatique d'une ville méditerranéenne :

Pour mesurer et de préciser l'aridité du climat, un indice d'aridité a été développé par Emmanuel de Martonne (Martonne, 1926) un indice simple où P est la pluviométrie annuelle en mm et T la température moyenne annuelle en °C : $I = P / T + 10$.

Si $I > 30$ le type est du climat est humide, si $20 < I < 30$ climat semi-humide ; si $10 < I < 20$ climat semi-aride ; si $I < 10$ semi aridité, puis aridité.

L'indice d'aridité de Martonne pour la ville de Bejaia (Source : station métrologique de Bejaia, 2009/2013) :

$$IM = \frac{p}{10 + T_m} = \frac{896}{10 + 18} = 32$$

$$IM = 32$$

Selon l'indice d'aridité de De-Mortone ($Im > 30$), on constate que la ville de Bejaia est caractérisée par un climat plutôt humide.

Chapitre III : LE CONFORT THERMIQUE EN CLIMAT TEMPERE MEDITERRANEEN

Un autre indice utilisé pour mesurer l'aridité est le quotient pluviothermique Q_2 , établi par Louis Emberger (Emberger, 1939). En plus du total des précipitations P (en mm), cet indice prend en compte la moyenne des maxima du mois le plus chaud M (en K°) et celle des minima du mois le plus froid m (en K°).

Ce quotient permet de définir six bioclimats correspondant aux valeurs du Q_2 : un bioclimat subhumide correspond à $50 < Q_2 < 100$, un bioclimat humide entre $100 < Q_2 < 150$, puis per-humide. La semi-aridité commence à $Q_2 < 50$, l'aridité à $Q_2 < 30$, et la per-aridité à $Q_2 < 20$ (Emberger, 1955), (Tassin, 2012).

➤ situation bioclimatique de Bejaia : selon le quotient pluvi-thermique d'Emberger, basé sur les données climatiques de la ville de Bejaia (Source : station métrologique de Bejaia, 2009/2013) :

$$Q_2 = 2000 P / M^2 - m^2$$

$$Q_2 = 2000 * 896 / (304.1)^2 - (280.9)^2$$

$$Q_2 = 132.03$$

Sur la (Fig. 3.9) la valeur $Q_2 = 132.03$ correspond au type bioclimat humide, comme cela est indiqué sur le diagramme pluvi-thermique d'Emberger.

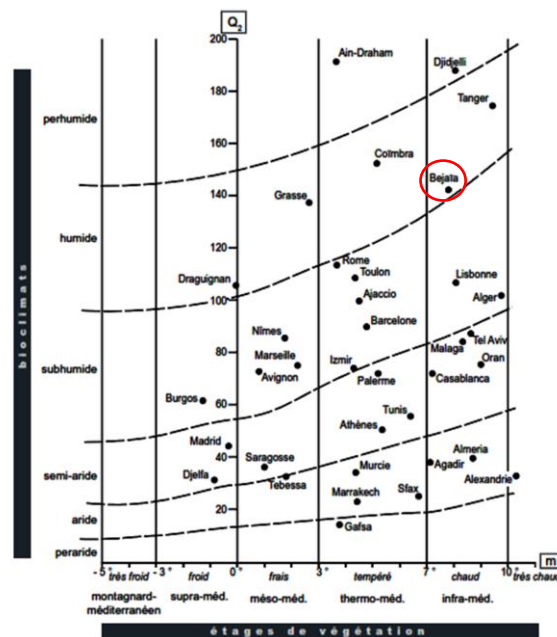


Figure 3. 9 Situation bioclimatique selon le diagramme pluvi-thermique d'Emberger (Tassin, 2012)

Cet exemple pris à Bejaia témoigne de la pertinence de cette méthode. Selon les résultats obtenus par le calcul des deux indices d'aridité, la ville est classée dans un bioclimat humide.

Chapitre III : LE CONFORT THERMIQUE EN CLIMAT TEMPERE MEDITERRANEEN

3.3 La classification climatique Algérienne :

L'Algérie maghrébine, située au nord, appartient à la zone climatique méditerranéenne. En hiver, elle est exposée aux masses d'air froid du front polaire, tandis qu'en été, elle est influencée par l'air saharien. Le document technique règlementaire algérien, le DTR C3-2, classe les zones climatiques selon les critères suivants (CNERIB, 1997) :

La zone A : comprend le rivage de la mer et parfois le versant nord des chaînes côtières,

La zone B : comprend la plaine derrière le rivage de la mer et les vallées entre les chaînes côtières et l'atlas tellien : au sein de cette zone, on distingue une sous-zone B' qui comprend la vallée du Chélif ;

La zone C : comprend les Hauts-Plateaux compris entre l'atlas tellien et l'atlas Saharien ;

La zone D : comprend le Sahara, au sein de laquelle on distingue une sous-zone D.

Sur la région de Bejaia : quelques communes appartiennent à la classification zone A, le cas pour : Bejaia-Tichy- Aokas- Boukhelifa- Melbou- Souk El Terrine-Tala Hamza-Taourirl Ighil - Toudja - Oued Ghir- Adekar -Béni Ksila. Les autres communes appartiennent à la classification en zone B hormis la commune de Ighil ALI qui appartient à la classification zone C.

Dans une autre classification climatique par le CNERIB, trois grandes zones climatiques d'hivers H1, H2 et H3 et cinq zones climatiques d'été ont été définis selon l'influence de l'altitude (Fig. 3.10).

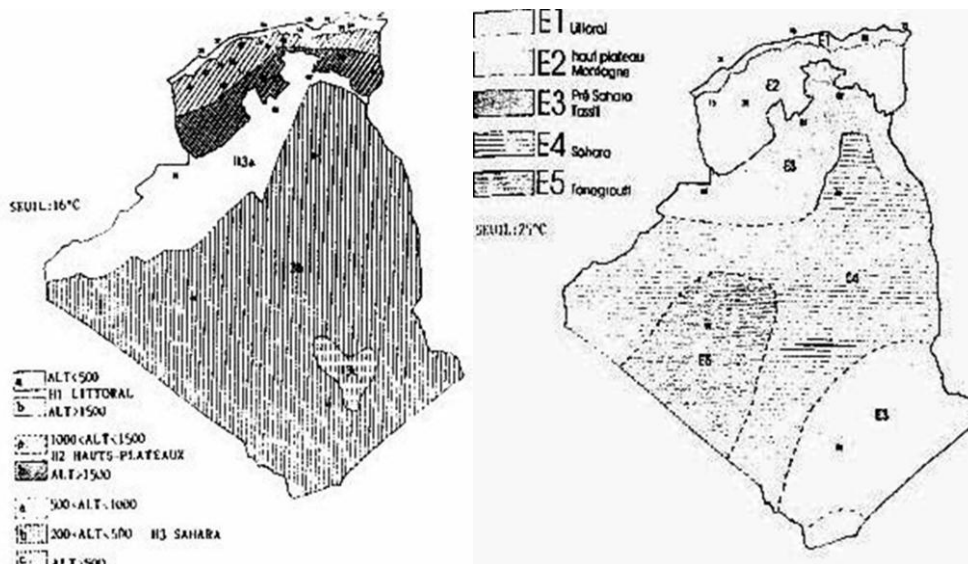


Figure 3. 10. Zone climatique en Algérie. (Source : Mokhtari, 2008).

Chapitre III : LE CONFORT THERMIQUE EN CLIMAT TEMPERE MEDITERRANEEN

3.3.1 Les zones climatiques d'hiver :

H1a : Littoral – mer	Altitude < 500 m
H1b : Arrière littoral- montagne	Altitude > 500 m
H2a : Atlas tellien- montagne	1000 m < Altitude < 1500 m
H2b : Atlas saharien- montagne	Altitude > 1550 m
H3 a: Pré Sahara	500 m < Altitude < 1000 m
H3 b: Sahara	200 m < Altitude < 500 m
H3 c: Hoggar	Altitude > 500 m

Chaque zone a des caractéristiques spécifiques :

- La zone H1a se caractérise par des hivers doux avec des amplitudes faibles alors que la zone H1b a des hivers plus froids et plus longs
- La zone H2a est caractérisée par les hivers froids et un écart de température diurne important.
- La zone H2b se caractérise par des hivers encore plus froids que la zone a.
- La zone H3a est remarquable par des hivers très froids. La nuit par rapport au jour. Les écarts de températures entre le jour et la nuit sont importants.
- La zone H3b se caractérise par des hivers moins froids que La zone H3a avec des écarts de température diurne.
- La zone H3c se caractérise par des hivers froids analogues à la zone H3a mais qui persistent même durant la journée.

3.3.2 Les zones climatiques d'été : Cinq zones déterminent les zones climatiques d'été

- La zone E1 qui subit l'influence de la mer.
- La zone E2 qui subit l'influence de l'altitude.
- Les zones E3, E4 et E5 subissent l'influence de la latitude.

Chaque zone a les caractéristiques suivantes :

- La zone E1 se caractérise par des étés chauds et humides, l'écart de température diurne est faible.
- La zone E2 se caractérise par des étés plus chauds et moins humides avec des écarts de température diurne importants.
- La zone E3 se caractérise par des étés très chauds et secs mais moins pénibles qu'en zone E4.
- La zone E4 se caractérise par des étés secs mais plus chauds et plus secs qu'en zone E3.

Chapitre III : LE CONFORT THERMIQUE EN CLIMAT TEMPERE MEDITERRANEEN

-La zone E5 se caractérise par des étés chauds et secs et extrêmement pénibles par rapport aux zones E3 et E4. C'est la zone la plus chaude en Algérie.

Sur le territoire de la région de Bejaia, l'altitude et le relief se distinguent (Khellaf, 2014). Depuis le bord de la mer, on peut observer une masse de crête rocheuse connue sous le nom de Djebel Gouraya, culminant à 672 mètres d'altitude. Il existe également un petit massif calcaire atteignant une altitude de 454 mètres, ainsi que le versant Sud d'Ighil-Izza, dont l'altitude atteint les 359 mètres. Ajoutons à cela le Cap Carbon, qui forme une sorte de presqu'île aux pentes abruptes (Khellaf, 2014), exposées au versant nord et s'élevant à 225 mètres d'altitude.

Une succession de falaises, de zones rocheuses, et de plages composées de sable, de galets, ou de mélanges de ces éléments caractérisent les côtes occidentales et orientales de Bejaia.

En synthèse :

Une partie de la région de Bejaia s'étend le long du littoral de la mer et sur le versant nord des chaînes côtières, tandis que l'autre partie se trouve à l'arrière du littoral, nichée dans les vallées entre les chaînes côtières et l'Atlas tellien. Par conséquent, elle relève de la classification des zones climatiques pour l'hiver : H1a - Littoral – mer et H1b - Arrière littoral - montagne. Pour la classification d'été, elle appartient à la zone E1, ce qui signifie qu'elle subit l'influence de la mer, caractérisée par des étés chauds et humides, avec un faible écart de température diurne.

3.4 Le confort thermique et les approches d'évaluation :

Le confort thermique est défini par ASHRAE 55 comme étant : « cette condition d'esprit qui exprime une satisfaction envers l'environnement thermique et estimée par une évaluation subjective » (Atlanta: American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers 2004), en plus six facteurs influencent les conditions du confort thermique : Le métabolisme, l'habillement, la température ambiante de l'air, la température moyenne des parois, l'humidité relative de l'air (HR) et la vitesse de l'air.

A travers la littérature récente, deux approches distinctes sont identifiées pour déterminer le confort thermique : La première approche est le modèle de Fanger et la deuxième approche est le modèle adaptatif (Rupp, 2015).

3.4.1 Le modèle de Fanger

Le modèle de Fanger : Le premier modèle classique à l'état d'équilibre pour les espaces climatisés a été développé par Fanger dans les années 1970 (P.O Fanger, 1972). Il repose sur le bilan thermique du corps humain et vise à prédire la sensation thermique moyenne d'un groupe de personnes ainsi que leur pourcentage de « mécontentement » vis-à-vis de l'environnement thermique. Cette méthode est exprimée par les indices suivants : le vote moyen prévisible (PMV) et le pourcentage prévisible d'insatisfaits (PPD). Le PMV constitue la base des normes ISO 7730 et ASHRAE 55.

3.4.2 Le modèle adaptatif

La deuxième approche repose sur le principe adaptatif : "S'il se produit un changement de nature à produire un inconfort, les personnes réagissent de manière à rétablir leur confort" (Humphreys, 1998). À travers des études et enquêtes sur le terrain dans des bâtiments à ventilation naturelle menées par Nicol et Humphreys (J. F Nicol, 1973), (J. F Nicol, 2002), ainsi que par Dear, Brager et Cooper (R. J. De Dear ,2002 ; R. De Dear, 1998b), des données sur l'environnement thermique ont été recueillies avec les réponses thermiques simultanées des sujets dans leur quotidien (J. F. Nicol, 2002). Ce modèle se base sur trois aspects interdépendants : psychologiques, comportementaux et physiologiques, qui ne sont pas pleinement pris en compte dans la méthode PMV-PPD.

Cependant, plusieurs études sur le confort dans des conditions thermiques différentes ont été réalisées, couvrant les environnements stables et uniformes ainsi que les environnements non uniformes et dynamiques (Rupp, 2015). Le modèle de Fanger s'est avéré uniquement applicable aux environnements stables et uniformes (Zhang, 2009).

D'ailleurs le modèle adaptatif a été inclus dans la norme ASHRAE 55 comme une méthode facultative d'évaluation des bâtiments à ventilation naturelle, et dans l'EN 15251 en 2007. Il a été inclus dans la directive néerlandaise ATG et dans la proposition de la norme brésilienne de confort thermique.

Nicol et Humphreys (J. F. Nicol, 2002) ont affirmé que l'approche adaptative dépend et change avec les résultats de l'enquête du confort et ne s'appuyait pas sur une description spécifique de la saison. En outre la température du confort à l'intérieur des bâtiments naturellement ventilés dépend des valeurs de la température extérieure (voir équation 1), Puisque certains des paramètres environnementaux (température de l'air, humidité de l'air,

Chapitre III : LE CONFORT THERMIQUE EN CLIMAT TEMPERE MEDITERRANEEN

vitesse de l'air, température radiante moyenne et moyenne) et les facteurs personnels (activité et habillement) sont liés dans une certaine mesure à la température extérieure.

$$TComf = A * Ta out + B \quad \dots \dots \dots \quad (1)$$

D'où : T_{comf} = Température du confort [$^{\circ}C$]; $Ta out$ = température de l'air moyennes mensuelle [$^{\circ}C$]; A, B = constants.

Dans plusieurs travaux de recherches, les chercheurs n'affirment plus la validité de l'approche du bilan thermique, qui relie la température de confort intérieur aux facteurs environnementaux et personnels. Il s'agit de facteurs de transition qui peuvent éventuellement être liés à la température de l'air extérieur ou au climat local: température et humidité de l'air, vitesse relative de l'air, température moyenne de rayonnement, isolation des vêtements et taux métabolique (Halawa, 2012).

Pour que l'approche adaptative soit scientifiquement réalisable, cette question doit être résolue en présentant une formule mathématique qui exprime tous les facteurs thermiques de transition en fonction de la température de l'air extérieur.

3.4.3 Application du model Adaptatif dans les bâtiments naturellement ventilés

Selon plusieurs études notamment celle du Dear (De Dear, 2007) et (Brager, 2004) : Les bâtiments à ventilation naturelle offrent à leurs occupants un degré de contrôle thermique supérieur à celui des bâtiments climatisés, cela augmente leurs tolérance aux écarts de température.

Le climat est un facteur à grande influence sur l'adaptation thermique des occupants dans les bâtiments à ventilation naturelle et la capacité d'adaptation pour obtenir la neutralité thermique dans ce type du bâtiment diffère selon les zones climatiques (Toe, 2013).

Dans l'expérience de Toe et al 2013 en climat chaud et sec, environ 80% des occupants qui ont votés « Confortable » apparaissent dans des écarts de température $2^{\circ} C$ au-dessus de la température opérative neutre supposée et $6^{\circ} C$ au-dessous. La plage de températures confortables est plus grande pour les climats chauds et secs, environ $8^{\circ} C$ pour 80% des votes «confortables», probablement puisque l'adaptation est plus facile lorsque l'humidité est plus basse (Toe, 2013).

Pour calculer la température de confort et la température opérative en climat chaud-sec, les équations suivantes sont définis (R. J. De, 2002; F. Nicol ,2010; Toe, 2013):

$$TComf = 0.31 Ta out + 17.8 \quad \dots \dots \dots \quad (2)$$

Chapitre III : LE CONFORT THERMIQUE EN CLIMAT TEMPERE MEDITERRANEEN

thermique globale, ces résultats correspondent à celle obtenus dans les recherches antérieures sur les mêmes modules et systèmes de murs et les résultats de l'outil d'évaluation d'énergie AccuRate.

Les résultats de l'étude pilote du (O Efeoma, 2014) démontre comment les bureaux de travail peuvent être conçus plus efficacement pour atteindre le confort thermique et utiliser moins d'énergie à travers l'approche adaptative. Pour évaluer le confort thermique à l'intérieur des bureaux, une campagne de mesure a été effectuée au niveau de chaque bureau principalement pour : la température opérative et la vitesse de l'air et la température moyenne dominante du mois de l'expérience. Les valeurs sont analysées à l'aide de l'outil du confort thermique pour le « Center for Built Environment » un outil d'analyse du confort thermique en ligne de la norme ASHRAE Standard 55 (Hoyt, 2017). L'étude conclut qu'à une vitesse de l'air minimale, quelques bureaux sont conformes au modèle adaptatif, cependant d'autre le seront à une vitesse de l'air de 0.6 m/s. En plus les travailleurs prennent les mesures disponible pour s'adapter à leur environnement de travail tel : les fenêtres ouvrantes, les ventilateurs, l'habillement ou le changement du niveau d'activité. Cela montre qu'avec une certaine forme d'adaptation, le confort thermique peut être atteint conformément au modèle adaptatif de la norme ASHRAE 55 (O. Efeoma, 2014).

3.5 Le confort thermique à travers l'architecture traditionnelle et vernaculaire.

La recherche des fondements d'une construction énergétiquement efficace nécessite l'étude approfondie de l'architecture traditionnelle et vernaculaire. Ces habitations primitives à faible consommation d'énergie se caractérisent par des conditions de confort adaptées à chaque contexte climatique. En effet, avant le XXe siècle, les connaissances et les pratiques de construction efficaces étaient transmises de génération en génération. Les codes et expériences partagés contribuaient à l'amélioration des conditions de vie, ainsi qu'au développement de techniques de construction.

Certaines règles relatives à la prise en compte du climat avaient déjà été édictées dès l'Antiquité, comme en témoigne l'ouvrage "Les Dix Livres d'Architecture" de l'architecte romain Vitruve (Marcus, 1837). Vivant au premier siècle, Vitruve évoque les réflexions de son époque concernant la disposition des bâtiments, soulignant qu'ils devaient être adaptés au pays et au climat. Avant d'ériger une ville, il était préconisé de sélectionner un site répondant à certains critères, comme la santé du lieu, son élévation, et une température

Chapitre III : LE CONFORT THERMIQUE EN CLIMAT TEMPERE MEDITERRANEEN

ambiante agréable. Il était également recommandé que le site ne soit pas exposé à des températures excessivement élevées ou basses, tout en évitant une trop grande exposition au soleil.

L'aménagement des pièces de l'habitation constitue l'un des aspects particuliers auxquels Vitruve accorde une attention particulière : les salles à manger et les bains doivent être orientés vers le couchant en hiver afin de profiter de la luminosité du soleil couchant et de sa chaleur douce. En revanche, les chambres à coucher et les bibliothèques devraient être tournées vers le soleil levant, étant donné que leur utilisation requiert la lumière matinale.

La maison noire (blackhouse), située sur l'archipel écossais des Hébrides, représente un exemple d'habitation adaptée aux conditions climatiques subatlantiques, caractérisées par des températures fraîches et une humidité importante. Ce domicile, qui abrite à la fois des hommes et des animaux, est construit à partir de matériaux locaux tels que des pierres grossièrement taillées et est coiffé d'une toiture en chaume (voir la Figure 3.11). La structure de cette habitation se compose de deux rectangles étroits et parallèles. Les salles de vie, situées au centre, font face à l'écurie.

Pendant la saison hivernale, les animaux contribuent à réchauffer le foyer ouvert alimenté en tourbe. De plus, ces habitations étaient occupées de manière permanente. De petites lucarnes et quelques interstices dans la couverture ont servi de cheminées en permettant à la fumée de s'échapper (Gonzalo, et al, 2006).



Figure 3.11 La maison noire (blackhouse) à Arnol sur l'île Lewis.
<http://www.britainexpress.com/attractions.htm?attraction=1267>

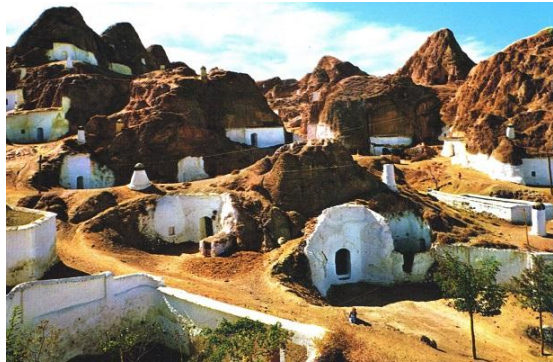


Figure 3.12 La maison troglodytique d'Andalousie à Guadix.

Les maisons troglodytiques du village andalou de Guadix représentent un autre exemple d'habitation adaptée au climat méditerranéen. Ces habitations, enfoncées dans le sol, se caractérisent par leurs entrées et cheminées peintes en blanc, émergeant harmonieusement du paysage (Maison Monde, 2021). Cette conception particulière contribue à maintenir une température ambiante moyenne d'environ 20 °C, assurant un confort thermique sans recourir à des systèmes de chauffage ou de climatisation (voir la Figure 3.12).

Cette architecture troglodytique, élaborée dans des grottes aménagées ou creusées en puits dans le sol, atteste d'un savoir-faire et de techniques qui ont évolué au fil des millénaires dans différentes régions climatiques. Dans des zones semi-désertiques arides en été et glaciales en hiver, où les matériaux de construction sont rares, la maison creusée du fleuve Jaune s'inscrit dans la tradition architecturale chinoise (Loubes, 1988). Sous une couche argileuse, les variations de température à l'intérieur ne dépassent pas 10 °C, que ce soit en été ou en hiver.

Un autre exemple de l'architecture islamique illustre les principes de l'habitat à basse consommation d'énergie. La protection contre les rayons solaires, la ventilation, et l'évaporation de l'eau sont des éléments clés pour maintenir le confort intérieur. De plus, le système des tours à vent, connu sous le nom de "Le badgir", était très efficace dans

Chapitre III : LE CONFORT THERMIQUE EN CLIMAT TEMPERE MEDITERRANEEN

l'architecture persane. Il permettait de capter les vents et de les canaliser vers l'intérieur, rafraîchissant ainsi les espaces bas dans les mosquées et les maisons pendant la journée (voir la Figure 3.13).



Figure 3.13 Tour à vent «Badgir », Iran. (Firbal, 2012)

Dans les régions chaudes, la terre glaise est un matériau très répandu pour améliorer le confort thermique dans les constructions traditionnelles à l'échelle mondiale, cela s'accompagne aux modes de construction du pisé et l'adobe, en ajoutant la paille. Les égyptiens ont utilisé des murs épais de brique ou tuiles, et plus tard les grecs et les romains ont utilisé des murs creux, le constructeur sédentaire a cherché souvent des matériaux de bonne isolation thermique. L'expérience de construction en terre glaise, a été reprise par l'architecte égyptien Hassen Fathy en réalisant des lotissements sociaux, à la ville-Oasis, et afin d'assurer le confort intérieur dans un tel climat chaud et aride, l'orientation des bâtiments tient compte du soleil et des courant d'air qui constituent un moyen de rafraîchissement de l'intérieur.

Les données climatiques et énergétiques ont été prises en compte naturellement pour la construction de l'habitat humain dans des conditions extrêmes, en produisant une architecture climatique qui est née en même temps que l'architecture elle-même.

Vers la fin du XIXe siècle, à l'ère du progrès scientifique, notamment dans le domaine de la construction, les scientifiques ont entrepris des études sur l'isolation thermique, le préchauffage des salles de service, et la circulation de l'air. Au début du XXe siècle, les bases théoriques nécessaires à la réalisation d'une maison économe en énergie avaient déjà été élaborées, et l'isolation thermique était devenue une règle fondamentale (Constantin, 2015). Dans les années 60, des méthodes d'estimation du confort thermique et de la charge énergétique des bâtiments ont fait leur apparition.

Chapitre III : LE CONFORT THERMIQUE EN CLIMAT TEMPERE MEDITERRANEEN

La crise pétrolière de 1973 a accentué l'intérêt pour l'efficacité énergétique des bâtiments, notamment en ce qui concerne les techniques passives, les fenêtres à double vitrage et l'utilisation de l'énergie thermique du soleil. Dans le domaine de la construction, l'émergence de l'architecture "solaire", visant à créer des structures entièrement autonomes grâce à l'énergie solaire, a évolué vers la voie de l'architecture "bioclimatique". Cette dernière, en s'appuyant sur des dispositions architecturales, vise à offrir aux occupants des bâtiments un confort optimal tout en minimisant la consommation d'énergie.

Par la suite, l'émergence progressive du concept de développement durable a entraîné l'adoption de nouvelles stratégies de conception des bâtiments, intégrant les principes de durabilité pour limiter l'impact environnemental d'un édifice. Ainsi, le bâtiment durable est devenu une composante importante du développement durable.

3.6 L'architecture vernaculaire en climat tempéré chaud méditerranéen :

Les exemples vernaculaires dans la construction de l'habitat témoignent d'une richesse d'enseignements et d'expériences sur l'ingéniosité nécessaire pour s'intégrer à la rudesse des conditions climatiques de la région tout en construisant un habitat qui réponde aux besoins du confort humain. Un exemple de cela est la maison du Mzab dans un climat désertique, ou encore l'igloo des Inuits dans un climat polaire.

Dans de nombreuses régions méditerranéennes, les bories et la construction en pierres sèches se manifestent. La voûte en fausse coupole a été utilisée pour les tombes mycéniennes dans le domaine égéen au sud de la Grèce dès le XVI^e siècle av. JC. Les murs de ces cabanes sont en pierres sèches et supportaient une toiture de branchages recouverte d'un enduit d'argile.

La maison en pierre sèche à plan rectangulaire remonte à l'âge néolithique (Galy, 1970). Dès le Xe siècle, une génération successive de cabanes a été construite sur la Haute Provence au sud d'Apt, sur le vaste plateau des Claparèdes, auxquelles se joignent des cabanes intactes construites depuis le Moyen Âge (Galy, 1970). Ces bories dispersées sur les terres forment de véritables hameaux, présentant une morphologie variée : certaines sont circulaires ou ovoïdes, tandis que d'autres adoptent une forme rectangulaire ou carrée (voir la Fig. 3.14).

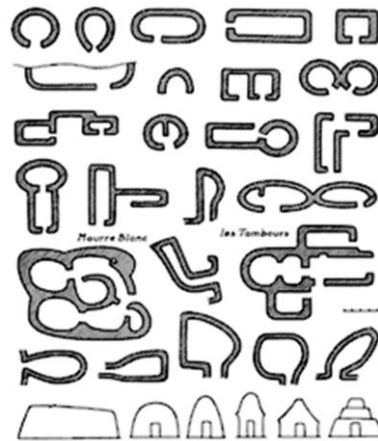


Figure 3. 14 Plans et profils courants des bories de Provence. .(source : Galy, 1970).

En climat méditerranéen, les deux contraintes climatiques se cumulent : le froid hivernal et la chaleur estivale. Le confort estival a été priorisé dans les TRULLI du quartier d'Alberobello dans les Pouilles en Italie, ainsi que dans l'habitat provençal traditionnel (Dutreix, 2010). Dans les constructions « TRULLI », le confort thermique durant la saison estivale est assuré par l'inertie thermique des parois. Les façades sont fermées au nord et ouvertes au sud, et la disposition du village a été réfléchi de manière à se protéger du mistral, un vent froid et sec qui gèle les habitations en hiver et les assèche en été.

Le trullo est une cabane à voûte de pierres sèches, clavée ou encorbellée, comme l'indique le terme dialectal truddu. Il s'agit d'un bâtiment rural répandu dans la province de Bari, dans la région des Pouilles en Italie du Sud. Cette cabane, aux murs d'une épaisseur considérable et à la coupole en pierre sèche, abrite une cellule destinée à un usage d'habitation avec une entrée couverte d'un fronton. Elle est associée à une ou deux pièces plus petites servant au repos nocturne, à la cuisine et au chauffage, s'ouvrant sur la pièce centrale par un arc clavé (Lasseur, 2011). Les trulli, présentés sur la Fig. 3.15, sont présents dans l'habitat dispersé ou dans les agglomérations, sur une plaine quadrillée par un réseau de murs en pierre sèche délimitant des vignes et des oliveraies.

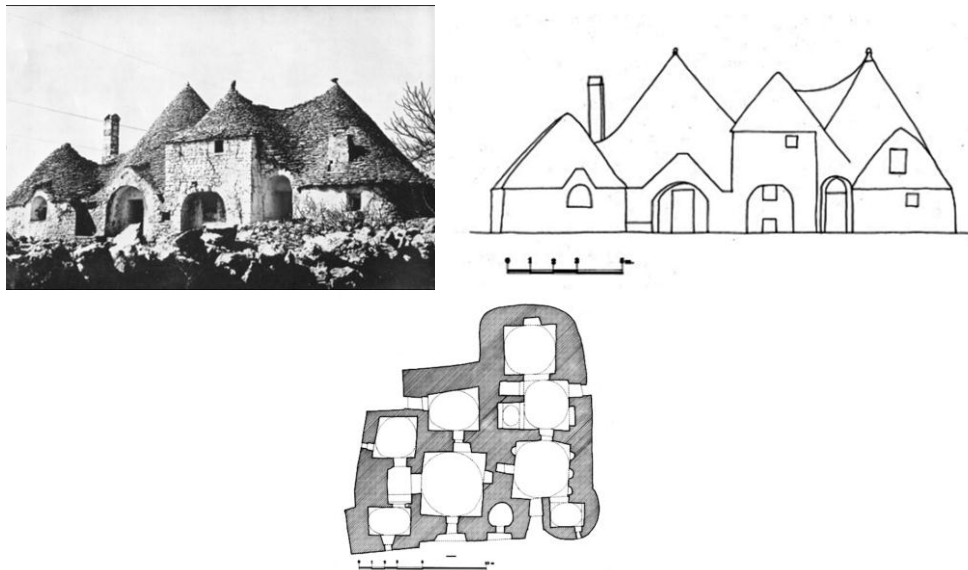


Figure 3. 15 Une ferme à trulli avec plan et élévation, dans le terroir d'Alberobello dans les années 1970. (Source : Luigi, 1978).

Au sud de la France, les Mas provençaux marquent le paysage méditerranéen. Il s'agit de constructions rurales entourées principalement de vignes et d'oliveraies, utilisées comme demeure ou bâtiment à vocation agricole ou d'élevage.

Construits avec des matériaux locaux, tels que des moellons grossièrement équarris, les Mas ont leurs murs extérieurs enduits de chaux de teinte claire. Le mas provençal (voir la Fig. 3.16) s'adapte au climat de sa région grâce à son orientation sud, une mesure visant à se protéger du Mistral. La façade est opaque du côté nord, à l'exception de quelques ouvertures réservées à la ventilation naturelle des locaux, comprenant de petites fenêtres étroites munies de lourds volets sur les façades est/ouest. Il présente une forme presque parallélépipédique et est surmonté d'une toiture à deux faibles pentes habillées de tuiles romaines.

Une considération particulière à la circulation de l'air au niveau de la conception intérieure, l'entrée principale se situe sur la façade sud et desservie à l'escalier et à la terrasse, cette dernière a un accès direct aux pièces à vivre, tandis que la salle à manger occupe la façade sud (Dutreix, 2010).



Figure 3. 16 Mas traditionnel provençale. Source (Team, 2016).

Sur la région de Bejaia, la construction traditionnelle prédominante est la Maison Kabyle. Ce modèle de construction, abritant à la fois l'homme et l'animal, se retrouve dans plusieurs régions méditerranéennes telles que la Corse, l'Italie, les villages catalans, le Midi de la France et en Syrie. Ces constructions anciennes partagent les mêmes caractéristiques que la maison kabyle, se distinguant notamment par leur structure en longueur et leur couverture en chaume.

La maison kabyle, également appelée « axxam », est divisée en trois parties intérieures (voir la Fig. 3.17). Chaque espace a un nom et une fonction spécifiques selon les sources (Genevois, 1965; Charly Guibbaud; Abouda, 1985) : Taqaât, Addaynin, Taarict.

- Taqaât constitue le séjour de la famille, étant l'espace principal réservé aux humains pour leurs activités telles que la cuisine, les repas et le sommeil. Occupant les deux tiers de la surface intérieure de la maison, le sol de la Taqaât est recouvert d'un enduit de graviers et de chaux. Elle est surélevée d'environ 40 centimètres par rapport à Addaynin, qui est l'espace réservé aux animaux et dont le sol est pavé de grosses dalles.

- Au-dessus de l'Addaynin se trouve Taarict, une soupente faite de planches. Cet espace sert au stockage des réserves alimentaires dans les akoufis (grandes jarres en terre cuite) disposés sur la taddekkant. De plus, Taarict peut être utilisé comme espace de nuit durant l'hiver, tandis que taddekkant devient un espace de repos pendant la journée en été.

Cette construction en pierre ne possède qu'une seule fenêtre, utilisée à la fois pour l'évacuation de la fumée et l'éclairage. L'accès à l'ensemble des espaces intérieurs se fait par une unique entrée du côté est, donnant sur une cour intérieure clôturée et munie d'une porte d'accès vers l'extérieur. La maison est surmontée d'un toit à deux pentes recouvert de tuiles, et l'isolation thermique de la toiture est assurée en utilisant de la paille, ou plus

Chapitre III : LE CONFORT THERMIQUE EN CLIMAT TEMPERE MEDITERRANEEN

fréquemment des roseaux appelés « igunan », particulièrement dans les régions proches des sommets enneigés.

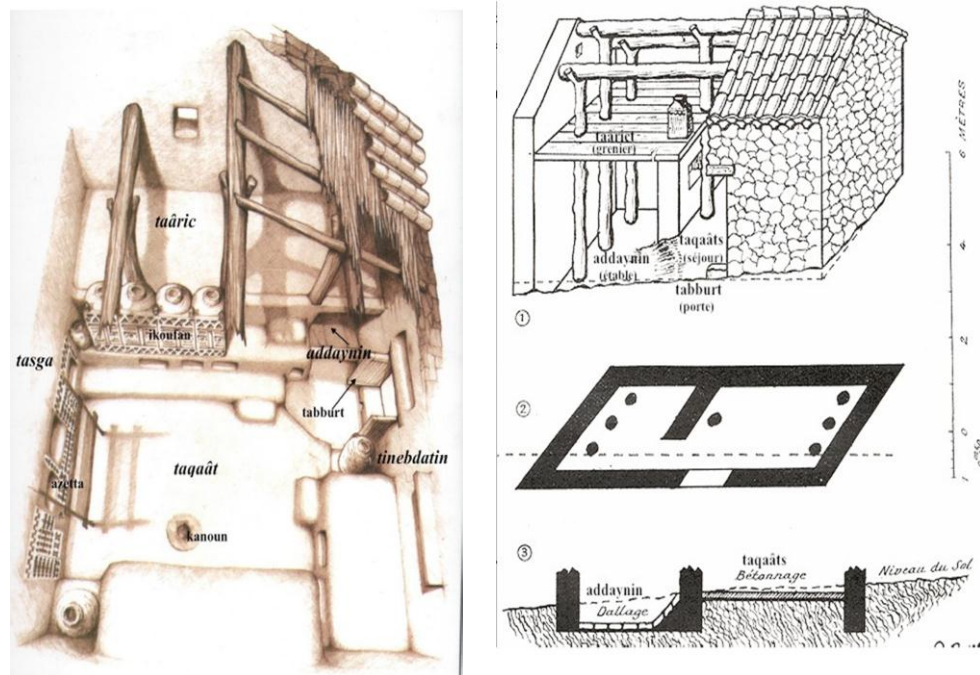


Figure 3. 17 La division des espaces intérieurs. Source (Abouda ,1985).

L'exemple de la maison kabyle dans le village Ait Raâ de la commune de Kendira, dans la wilaya de Bejaia, témoigne de ses qualités en matière de performances énergétiques (Messaoudi, 2017). Cela est assuré par des solutions bioclimatiques, notamment l'orientation des maisons visant à optimiser l'ensoleillement, la disposition des espaces intérieurs, les procédés de construction, et l'utilisation de matériaux locaux à forte inertie thermique. De plus, les parois de cette maison se caractérisent par une faible conductivité thermique, avec des valeurs s'étalant entre 0.055 et 0.84 W/mK, grâce à l'utilisation de pierre, terre crue, paille, bois, chevron, et branchages dans l'ensemble du bâtiment.

Synthèse :

Selon la section précédente, l'adaptation au climat de la région est un principe important dans l'architecture au fil du temps. Selon Vitruve, le style des bâtiments devrait différer entre l'Égypte et l'Espagne. Les bâtiments vernaculaires, construits avec des matériaux locaux, témoignent d'un plus grand respect de l'environnement existant et tiennent compte des contraintes climatiques. Ils représentent des exemples typiques d'une conception bioclimatique réussie (Labaki, 1998), permettant un confort thermique même dans des

Chapitre III : LE CONFORT THERMIQUE EN CLIMAT TEMPERE MEDITERRANEEN

conditions climatiques rigoureuses grâce à des moyens technologiques simples. Les abris s'adaptent au climat par leurs formes, leurs matériaux, et leurs procédés de construction.

L'architecture vernaculaire illustre l'harmonie entre les habitations, les habitants, et l'environnement physique (Singh, 2009). L'application de techniques traditionnelles et de concepts vernaculaires améliore à la fois la qualité du confort thermique et l'économie d'énergie.

Conclusion :

Ce chapitre a permis d'explorer en détail les subtilités complexes du climat méditerranéen, du confort thermique et de l'architecture traditionnelle vernaculaire. En analysant de manière approfondie ces trois volets essentiels. La définition du climat et ses paramètres a révélé qu'il existe une influence directe de l'ensoleillement, de la température, du vent, de l'humidité relative et des précipitations sur le confort thermique. La délimitation du domaine méditerranéen a tracé les contours spatiaux, tandis que la caractérisation climatique a fourni une toile de fond essentielle.

Sur l'évaluation du confort thermique et les approches d'évaluation, l'application du model Adaptatif dans les bâtiments naturellement ventilés en méditerranée a apporté des éclairages précieux, soulignant sa pertinence et son adaptabilité dans des contextes climatiques spécifiques.

Un examen de l'architecture vernaculaire méditerranéenne révèle une ingéniosité à s'adapter à la rigueur des conditions climatiques en utilisant des matériaux locaux tels que la pierre sèche, des toitures de branchages recouvertes de paille, de roseaux, et d'un enduit d'argile. L'orientation des abris et de leurs façades a été minutieusement pensée par rapport au soleil et aux vents dominants.

**CHAPITRE IV : ETAT DE L'ART DES BATIMENTS
NZEB_NEARLY ZERO ENERGY BUILDINGS**

Introduction

La question de l'optimisation de l'efficacité énergétique dans les bâtiments résidentiels a suscité l'intérêt de plusieurs études (De Boeck et al. 2015) et leurs investigations se développent sur différents domaines d'application dans des contraintes et paramètres spécifiques. Comme cela a été détaillé en première étape de cette thèse, plusieurs techniques et facteurs influencent la performance énergétique du bâtiment : l'isolation et l'étanchéité de l'enveloppe et la toiture, les caractéristiques des fenêtres et les systèmes CVC et le comportement des occupants.

Au chapitre II nous avons vu que pour réduire la consommation énergétique du bâtiment et atteindre les conditions de confort thermique plusieurs techniques sont utilisées : le système de chauffage solaire passif et les techniques du refroidissement passif et d'autres mesures techniques comme le chauffe-eau solaire et les capteurs solaires. En plus, six facteurs déterminent la consommation énergétique dans le bâtiment : le climat, l'enveloppe du bâtiment, les systèmes énergétiques et les services du bâtiment, l'exploitation et la maintenance du bâtiment, le comportement des occupants, la qualité de l'environnement intérieur produit.

Dans le chapitre III le confort thermique en climat tempéré méditerranéen a été exploré, mettant en lumière les notions fondamentales relatives au climat méditerranéen et les aspects cruciaux du confort thermique et les approches d'évaluation dans ce contexte particulier.

L'objectif de ce chapitre est d'explorer les stratégies plus récurrentes des projets existants NZEB dans le contexte international et spécifiquement en climat méditerranéen afin de fournir les informations nécessaires à l'amélioration de la performance énergétique des bâtiments étudiés à savoir : les paramètres d'enveloppe, et systèmes CVC.

L'analyse des bâtiments NZEB réalisés et les données réelles de performances opérationnelles peut fournir des connaissances réelles sur leur comportement, tout au long de la durée de vie des bâtiments et dans différentes conditions d'exploitation. Ces exemples de réalisations permettent de tracer des repères pour le parc immobilier existant et futur permettant de mieux concevoir les réseaux énergétiques. En revanche les études scientifiques basées sur la simulation numérique ne reflètent pas les conditions du «monde réel» telles qu'exploitées (Causone, 2019; Granderson, 2018).

4.1 Les stratégies de performance énergétique dans les projets NZEB

À partir de 2010, l'objectif principal en matière de performance énergétique des bâtiments était d'atteindre le statut de "zéro énergie", signifiant l'indépendance énergétique, l'autosuffisance et l'absence de factures (Voss, 2012; Coma, 2020).

L'Union européenne a introduit la directive 2010/31/UE comme principal instrument législatif visant à promouvoir l'amélioration de la performance énergétique des bâtiments (European Parliament, 2010). Cette directive exige que, à partir du 31 décembre 2018, tous les nouveaux bâtiments soient des "NZEB" (Nearly Zéro Energy Buildings), c'est-à-dire des bâtiments à consommation d'énergie quasi nulle (Parlement européen, 2010). De plus, elle définit le terme NZEB comme un bâtiment caractérisé par une très haute performance énergétique, dont la faible quantité d'énergie requise doit être couverte par l'énergie provenant de sources renouvelables produites sur place ou à proximité (Parlement européen, 2010).

Les bâtiments réels NZEB et les projets pilotes réalisés sont conçus et équipés en tant que laboratoires vivants (living lab) qui permettent la surveillance et l'essai de diverses technologies, ainsi que leur intégration dans le concept énergétique du bâtiment (Carlucci, 2017); À travers ces bâtiments, il est possible d'évaluer l'efficacité de la réduction des consommations d'énergie et/ou de l'augmentation de la qualité de l'environnement intérieur du bâtiment dans son ensemble.

Parmi les quatre-vingt-deux projets pilotes de maisons durables réalisés dans le monde entier au cours des cinquante dernières années (quelques projets sont illustrés dans la figure 4.1), une revue menée par (Coma, 2020) a révélé que la stratégie la plus populaire pour optimiser l'efficacité énergétique est l'isolation thermique (murs, planchers, fenêtres, toiture) dans 89 % des cas d'études, avec un niveau d'isolation élevé. Le système MVHR (ventilation mécanique à récupération de chaleur) a été utilisé dans 64 % des projets et est presque présent dans tous les projets récents depuis 2000. Pour l'approvisionnement en énergie renouvelable, les capteurs solaires thermiques sont utilisés à 79 %, les panneaux photovoltaïques à 58 %, et pour le stockage de l'énergie, les réservoirs d'eau chaude sont utilisés à 57 %. L'utilisation de ces technologies a évolué à des vitesses différentes au cours de l'évolution de l'architecture verte, comme en témoigne l'exemple du système de chauffage, qui est passé d'une chaudière à gaz à l'utilisation de pompes à chaleur géothermiques, puis aux pompes à chaleur à air dans 58 % des études de cas récentes en 2010 (Coma, 2020).



Figure 4. 1 Projets NZEB: a. Lime house (2011), b.Solcer house (2015). (Source: Coma , 2020)

Le travail de (Wang, 2017) passe en revue la performance énergétique et la qualité de l'environnement intérieur d'un bâtiment réalisé selon la norme Passivhaus à travers l'analyse de sensibilité paramétrique entre plusieurs paramètres, y compris la performance énergétique annuelle du bâtiment, le confort thermique humain et la qualité de l'air intérieur, concentration moyenne du CO₂ dans des conditions météorologiques différentes ainsi que les systèmes HVAC en cas d'hiver et d'été. Il est possible de réaliser en même temps l'efficacité énergétique et l'environnement intérieur favorable dans les bâtiments PH, grâce à l'optimisation et à l'ajustement appropriés des systèmes HVAC (CVC), de l'efficacité des échangeurs de chaleur de l'installation de récupération de chaleur et des systèmes de protection solaire (Wang, 2017).

En hiver ; un système de ventilation mécanique équilibré avec un échangeur de l'air direct à capacité 75% récupère suffisamment la chaleur pour alimenter les pièces du bâtiment. En été l'installation de récupérateur de refroidissement dans le système de contrôle de ventilation et l'augmentation de la valeur absolue du flux de chaleur améliorent les économies d'énergie (Wang, 2017). Par ailleurs le nombre des occupants et leur comportement affectent la demande énergétique et le confort thermique et le taux de surchauffe pourrait être réduit utilisant un système d'ombrage automatique (Wang, 2017).



Figure 4 2 La façade principale du "Chifley Passive House". (Source (Truong , 2017)

Dans la maison « Chifley Passive House », certifiée par Passivhaus en Australie, une liste d'exigences a été vérifiée : le plan intérieur et l'orientation, qui dépendent des gains en hiver et en été ; l'isolation thermique du plancher, des murs et de la toiture ; l'isolation des ouvertures, incluant le choix du type de cadre et de verre adapté au climat froid, avec $U=1.45 \text{ W/m}^2 \text{ K}$ et $g=0.4$. De plus, l'étanchéité est inférieure de 6 fois à la limite recommandée de 0.6 ACH50 et assure un renouvellement d'air de 0.1 par heure à 50 Pa. Pour la ventilation, chauffage et climatisation : le système MVHR de ventilation mécanique avec récupération de chaleur est adopté pour fournir de l'air frais et extraire l'humidité de l'air vicié sans perdre ni gagner de quantité de chaleur vers/de l'extérieure en outre ce système démontre son efficacité à éliminer la concentration de dioxyde de Carbone CO₂ à l'intérieur.

Le travail expérimental mené dans ce bâtiment (voir la figure 4.2) réalisé par Truong et al (Truong, 2017), confirme l'efficacité du standard Passive House dans le contexte australien outre que cette norme. Les principes de ce projet et son processus de conception a permis un résultat significatif avec 64% plus d'efficacité par rapport à une autre maison ordinaires, les températures intérieures étaient dans la zone du confort entre 20 ° C et 25 ° C pendant 96,1% du temps durant 12 mois sans utilisation de chauffage ni de refroidissement actifs. La concentration de dioxyde de carbone indique que l'air extérieur était fourni de manière adéquate par le système de récupération de chaleur à ventilation mécanique, même pendant de longues périodes où toutes les fenêtres étaient fermées (Truong, 2017).

4.2 Optimisation de l'isolation thermique

L'isolation thermique permet une ambiance thermique saine et confortable avec des valeurs acceptables de température de l'air et l'humidité relative, elle réduit le transfert de chaleur à travers l'enveloppe du bâtiment, de plus le choix de matériaux isolants efficaces et adaptés est un moyen essentiel de limiter l'impact sur l'environnement (Lakrafl, 2017) les intégrer dès la première phase de conception est recommandé pour réduire l'utilisation de l'énergie durant le cycle de vie du bâtiment (Yüksek, 2015).

Dans le cas échéant, les matériaux de construction utilisés contiennent des pores à l'intérieur desquels l'eau, sous forme liquide ou vapeur, est stockée ou restituée à l'environnement intérieur. Dans ce contexte, le transfert de chaleur s'accompagne du transfert d'humidité. C'est pourquoi il est nécessaire de connaître les propriétés thermo-hydrauliques de chaque élément composant l'enveloppe du bâtiment (Meukam, 2004) et de choisir un isolant thermique efficace caractérisé par une bonne résistance à la transmission de chaleur et une faible conductivité thermique.

Les matériaux de construction nouvellement développés apparaissent comme une alternative qui consomme moins d'énergie par rapport aux matériaux de construction classiques (Yüksek, 2015). Les matériaux naturels peuvent remplacer les substances conventionnelles et améliorer la conception de bâtiments durables (Latha, 2015) : le liège, le bois, la paille, la laine de roche, les briques, des pierres de roche et même la laine de mouton ou de coton peuvent être des matériaux isolants efficaces.

4.2.1 L'isolation thermique écologique à faible impact environnemental

De récents travaux de recherche ont été développés pour mettre en évidence la capacité d'isolation thermique de certains matériaux et leur impact sur la performance énergétique et environnementale du bâtiment :

A travers sa thèse sur les matériaux à base de fibre végétale l'étude de Collet (Collet, 2004) affirme que le béton de chanvre, la laine de chanvre et l'enduit chanvre chaux (figure 4.3) peuvent constituer une solution au problème de l'épuisement des ressources naturelles due à la construction. Ils sont des matières premières renouvelables et recyclables et contiennent peu d'énergie grise.

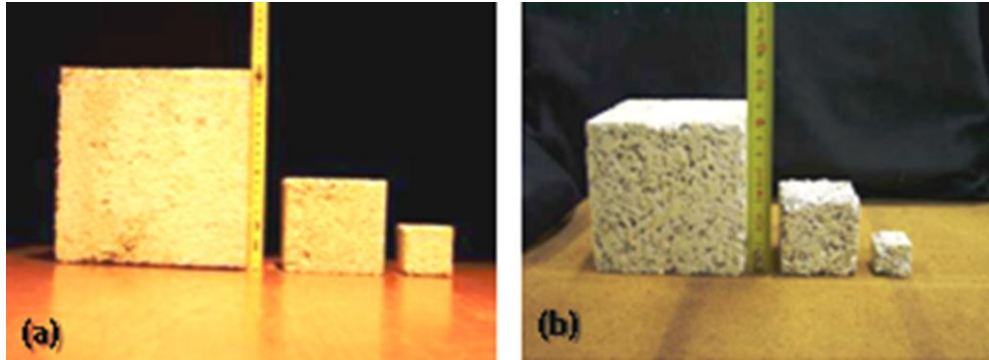


Figure 4.3 Echantillons d'enduit chanvre chaux (a), Echantillons de béton de chanvre (b). (Collet-Foucault 2004)

L'étude de Lakraflil et al, 2017 (Lakrafli, 2017) démontre que l'utilisation de déchets de cuir et de menuiserie comme matériaux isolants dans un bâtiment à Casablanca est une solution alternative pour réduire le transfert de chaleur et la consommation énergétique.

Roberto Bruno et al. (Bruno, 2017) évaluent la faisabilité d'un système d'assemblage à sec pour les murs opaques dans un bâtiment situé au sud de l'Italie. La meilleure configuration d'enveloppe pour le plancher, le mur vertical et la toiture consiste en un assemblage à sec de matériaux traditionnels et naturels, dont les isolants sont la fibre de bois et le sable sec. Ces matériaux sont montés sur un cadre métallique en acier, réduisant ainsi le temps de construction tout en respectant les normes sismiques.

Le sable sec encapsulé à l'intérieur des structures augmente la masse thermique, il est un matériau abondant et bon marché, largement disponible sur le chantier de construction, ces murs peuvent être modélisés aux dimensions appropriées directement sur le chantier pour réduire le gaspillage de matériaux, il s'agit d'un système capable de minimiser les besoins annuels en énergie thermique (inférieure à 15 kWh/m²).

En plus Sudhakar et al (Sudhakar, 2019) ajoute qu'en présence d'une forte humidité relative supérieure à 80% une condensation peut se produire : la valeur U (coefficient de transfert de chaleur) doit être maintenue à un niveau bas en installant des couches isolantes.

Cependant, l'utilisation de plusieurs couches isolantes entraîne une augmentation de la condensation. Pour résoudre ce problème, trois solutions d'isolation doivent être envisagées : une isolation extérieure, intermédiaire et intérieure. Tout d'abord, avec l'isolation du mur intérieur, le bâtiment peut être refroidi très rapidement, excluant ainsi la masse thermique. Ensuite, un pare-vapeur doit être ajouté entre la face extérieure de l'isolant et le béton pour assurer la protection contre la condensation. Enfin, l'utilisation

d'une couche isolante extérieure est recommandée pour protéger le mur contre les apports de chaleur solaire.

Comme solution aux étés chauds en méditerranée, le travail du C. Baglivo et al (Baglivo et al 2014) propose de sélectionner les matériaux de construction caractérisés par une masse d'accumulation thermique avec une densité élevée. Une valeur de capacité calorifique surfacique élevée et une forte admission sont nécessaires pour éviter la surchauffe en été.

D'autres matériaux synthétiques innovants constituent des alternatives pour améliorer les performances énergétiques et les émissions de cycle de vie : Panayiotou et al (Panayiotou, 2016) ont évalué l'application des MCP matériaux à changement de phase, sur l'enveloppe d'un logement en région méditerranéenne : une couche de PCM ajoutée entre la couche de brique extérieur et intérieur réalise une économie d'énergie de 28,6%. L'intégration du MCP dans les matériaux et l'enveloppe du bâtiment constitue une solution efficace pour réduire la consommation énergétique du chauffage et refroidissement et améliorer le confort des occupants.

Les résultats obtenus par Omrany et al (Omrany, 2016) concluent que : les systèmes de murs passifs tel que le mur trompe et l'utilisation du béton cellulaire autoclavé (AAC) et le mur à double peau, améliorent les performances thermiques et réduisent la consommation énergétique des bâtiments. Luo.Yongqiang et al (Luo, 2016) présente un nouveau système de paroi thermoélectrique photovoltaïque intégré au bâtiment (BIPVTE), il fonctionne en utilisant l'énergie électrique convertie à partir d'énergie solaire par les cellules photovoltaïques. Ce système est auto-adaptable à l'environnement thermique ambiant et peut réduire considérablement les gains de chaleur : lorsque la température de l'air intérieur est de 24 ° C, l'épaisseur et la conductivité thermique de l'isolant sont de 0,04 m et 0,05 W / m K, le mur BIPVTE peut réduire d'environ 70% le gain de chaleur quotidien par rapport au mur traditionnel.

4.2.2 Les isolants thermiques à base de fibre du bois :

Il est à noter que les isolants thermiques provenant de sources minérales et fossiles, dont la conductivité thermique est inférieure à ($\sim 0,035$ W/ (m.K), tels que la fibre de verre, le polystyrène extrudé, le polystyrène expansé et le polyuréthane, génèrent d'importantes émissions de CO₂ et entraînent une pollution environnementale en libérant des gaz toxiques et des particules (comme le SO_x et le NO_x) (L. Liu, 2017). De plus, le processus de fabrication de ces matériaux est énergivore (K. Manohar, 2016).

Cependant, les fibres naturelles issues de végétaux (Fig. 4.4), telles que les fibres de bois, de cellulose, de paille, de lin et de chanvre, présentent des avantages prometteurs en tant que matériaux d'isolation pour la construction en raison de leur abondance naturelle, de leur caractère renouvelable, de leur recyclabilité, de leur biodégradabilité, ainsi que de leur potentiel de stockage de carbone (Xingrong, 2024). La conductivité thermique des matériaux d'isolation dérivés de fibres naturelles se situe généralement entre 0,03 et 0,1 W/(m.k) (L.D. Hung Anh, 2021).

Le bois en tant que matériau de construction peut contribuer à réduire la part de la construction énergivore au strict minimum nécessaire. Il permet ainsi le stockage secondaire du CO₂ et, en adoptant une gestion forestière durable, contribuera à la réduction totale des émissions de CO₂ (Maximilian, 2023).



Figure 4 4 L' isolant thermique fibre de bois. Source : (Bien Isoler Ma Maison. 2023)

Les fibres de bois ou la farine de bois sont largement utilisées dans différentes applications de construction en raison de leurs propriétés favorables telles : qu'une capacité d'absorption élevée, une faible densité, un caractère écologique, une rentabilité économique et une inertie chimique (IchazoM, 2001).

4.2.3 Recommandations pour l'isolation thermique

En région du littoral algérien dont figure la ville de Bejaia :

- Le plus adapté est le type de bâtiments à construction légère à faible masse thermique : pour réduire le stockage de la chaleur qui peut avoir des effets négatifs sur les températures intérieures la nuit.

-L'enveloppe du bâtiment doit être équipées de solutions techniques pour favoriser la ventilation naturelle nocturne et le contrôle des rayons solaires transmis par les surfaces vitrées et opaques.

- Une valeur réduite du facteur de transmission thermique périodique est recommandé : le décalage temporel et facteur d'atténuation adéquat de l'onde thermique transmise permettent de supprimer les charges thermiques estivales et exploiter le refroidissement naturel nocturne.

-Pour diminuer le risque de condensation, considérer trois solution d'isolation : l'isolation extérieure, intermédiaire et intérieure et placer un par-vapeur entre la face extérieur d'isolant et le dernier matériau extérieur.

La sélection du matériau isolant tient compte :

- Des exigences écologiques : isolant à faible énergie grise, à faible impact environnemental.

-D'autres facteurs : Faible masse thermique, faible valeur de conductivité thermique, faible facteur de décrémentation, décalage temporel entre 10 à 18 heures, une masse d'accumulation thermique avec une densité élevée.

- Choisir une typologie de maçonneries des murs conventionnels au Nord de la méditerranée.

Sur cette base, l'amélioration des parois extérieures suggérée constitue : l'utilisation de l'isolant fibre du bois et une lame d'air placé au centre de la paroi, la brique pleine qui couvre l'extrémité extérieur de la paroi et la brique creuse est placé à l'intérieur. Essentiellement un système qui prévient le transfert de vapeur d'eau et le risque de condensation par un frein vapeur.

4.3 Optimisation des ouvertures

La fenêtre présente un rôle spécifique au bâtiment d'apporter les apports solaires, la lumière naturelle, de contrôler la ventilation intérieure et de réduire les risques de condensation tout en offrant une vue vers l'extérieur. Cependant, elle procure un risque de surchauffe, d'inconfort thermique et visuel et augmente la charge de refroidissement du bâtiment par la transmission excessive de la chaleur solaire et la lumière vers l'intérieur du bâtiment (Pereira, 2019; Moretti, 2015).

L'impact des propriétés du vitrage sur le confort thermique et visuel a été largement étudié par le biais d'une évaluation numérique et expérimentale sur le terrain (Tzempelikos,

2007). Des solutions avancées de contrôle solaire sont à l'exploration pour développer la technologie d'efficacité énergétique de fenêtre et arriver à la de fenêtre parfaite (Ye, 2013), trois direction sont appliquées : la régulation de la résistance thermique des fenêtres (la conception de la structure), la régulation des propriétés du spectre proche infra rouge (NIR) et la régulation des propriétés d'émission thermique des ondes à grande longueur.

Il existe de nombreuses technologies de conception de la structure de fenêtre : le vitrage multicouche, le double vitrage sous vide ou rempli du gaz, le vitrage photovoltaïque. D'autre technologie de régulation de propriété du spectre solaire : le vitrage teinté, le vitrage réfléchissant, les vitrages photochromique, électrochromique et le vitrage thermochromique. Pour réguler les propriétés d'émission d'onde thermique à grande longueur deux principaux revêtements sont utilisés : le revêtement à faible émissivité et le revêtement sélectifs spectralement (Chow, 2010).

Pour améliorer les propriétés optiques et thermique des ouvertures des cas d'étude ; nous explorons d'abord les technologies récente appliqués et testés dans la littérature de revue, mais bien avant cela les caractéristiques thermique et optiques du vitrage sont expliqués, puis nous étudions par simulation quelques cas de fenêtres à différentes caractéristiques: ces solution sont issue d'un choix à partir de la littérature de revus sur le sujet des fenêtres performante convenable en climat méditerranéen.

4.3.1 Les facteurs caractérisant les échanges thermiques au travers d'un vitrage :

Deux variables permettant de caractériser l'énergie transférée au travers d'une fenêtre vitrée. Il s'agit du coefficient de transmission thermique U aussi appelé (k) et le facteur solaire du vitrage g ou (FS).

a) Le coefficient de transmission thermique U

Lors d'une différence de température entre les deux côté d'un matériau, il se produit une transmission de chaleur. Le coefficient de transmission thermique d'une paroi est la quantité de chaleur qui traverse cette paroi en régime permanent par unité de temps, par unité de surface et par unité de différence de température entre les ambiances situées de part et d'autre de la paroi.

Pour la fenêtre, le coefficient U est aussi appelé K d'une fenêtre dépend du coefficient $U(K)$ du vitrage lui-même qui dépend principalement du : nombre de couches de verre, de la dimension de(s) l'espace(s) séparant ces couches de verres, du type de gaz qui remplit ces espaces et de la présence d'éventuelles couches déposées sur le verre.

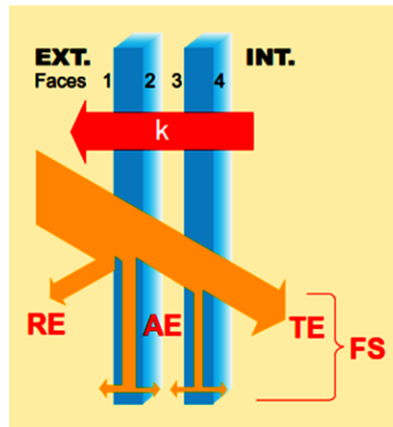


Figure 4.5 Le Facteur solaire d'un vitrage. (Source : Bodart, 2002).

b) Le facteur solaire g ou (FS)

Quand un rayonnement solaire frappe un vitrage, une partie de celui-ci est réfléchi, une partie est transmise directement au travers du vitrage et une partie est absorbée par le vitrage.

Le facteur solaire désigne la transmission totale de l'énergie solaire à travers le vitrage : la somme du rayonnement transmis et du rayonnement absorbé qui est réémis vers l'intérieur (Fig. 4.5).

4.3.2 Propriétés des vitrages par rapport au transfert d'énergie

La manipulation de l'énergie transmise réfléchi et absorbé à travers le vitrage pour différentes longueurs d'onde du rayonnement solaire peut augmenter les performances d'un vitrage.

a) La réflectivité et vitrages réfléchissants

Elle dépend de la qualité de la surface du verre, de la présence de couche et de l'angle d'incidence de la lumière.

Sa fonction optique pourrait être modifié en appliquant différentes couches métalliques sur sa surface avec des coefficients de réflexion ρ variables selon des rayonnements UV, ou IR infra rouges à grande ou courte longueur d'onde. Les couches d'oxydes métalliques sont utilisées pour augmenter la réflexion des UV, des IR de l'énergie solaire incidente et diminuer à fortiori la part d'énergie transmise cela diminue le facteur solaire g voir (Fig. 4.6).

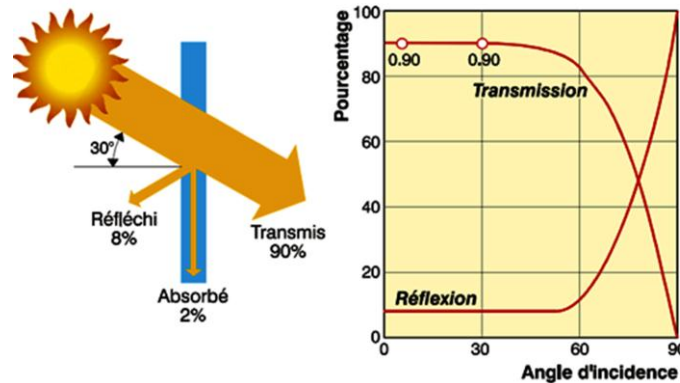


Figure 4.6 Evolution du pourcentage du rayonnement solaire réfléchi et transmis en fonction de l'angle d'incidence (Source : Bodart, 2002).

b) Émissivité et vitrages à basse émissivité

L'énergie solaire absorbée par un vitrage est réémise soit par convection d'air le long de sa surface, soit par rayonnement vers les autres surfaces. L'émissivité est la capacité d'un matériau à émettre de la chaleur de manière radiative,

Les fenêtres émettent typiquement des radiations sous forme d'infra rouges de grande longueur d'onde c'est pour cela que la réduction du flux de chaleur émis par les fenêtres sous forme de radiations peut améliorer ses propriétés isolantes.

Une couche métallique de faible épaisseur et de faible émissivité sera plus réfléchissante au rayonnement infra rouge que pour le rayonnement visible cela réduit le facteur solaire, c'est le principe du vitrage Low-E.

c) Transmissivité

La transmissivité est le pourcentage de rayonnement qui peut traverser un vitrage, elle se définit par rapport aux types de lumière ou d'énergie (aux rayons ultraviolets ou par rapport au spectre solaire total) ce qui décrit des caractéristiques différentes du vitrage.

Dans le domaine du visible la transmissivité du vitrage décrit sa possibilité à fournir de l'éclairage naturel, par exemple un vitrage teinté aura une transmissivité ou un coefficient de transmission lumineuse plus faible qu'un vitrage clair (Bodart, 2002).

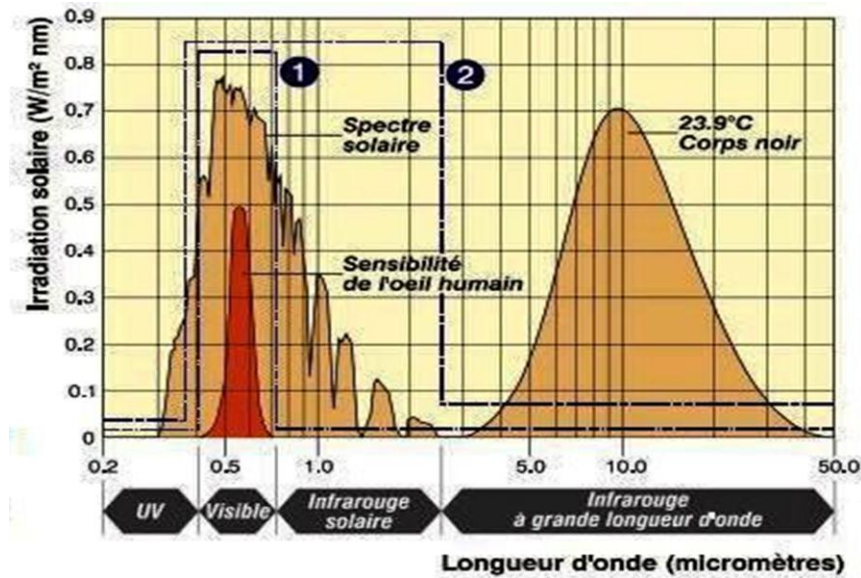


Figure 4.7 Transmission spectrale idéale pour deux vitrages en différents climats (Source : Bodart, 2002).

Un vitrage performant en climat chaud, optimise et transmette une quantité adéquate de lumière dans la portion visible du spectre et exclut les gains de chaleur superflus provenant des infrarouges à courte longueur d'onde (Fig. 4.7), par contre en hiver il capte le maximum de lumière et de rayons infrarouges de courte longueur d'onde et bloque le transfert de chaleur par IR de grande longueur d'onde. C'est le principe de fonctionnement des couches sélectives à basse émissivité dont sa position à l'intérieur du vitrage décrit sa fonction.

4.3.3 Réduction de la valeur U : Le vitrage multiple

a) Le Double et Triple vitrage

Le double vitrage consiste en un ensemble de deux vitres séparées par une lame d'air déshydraté ou un gaz améliorant l'isolation thermique (l'argon, le krypton et le xénon), il permet de ralentir la transmission de chaleur dont le coefficient de transmission thermique U devient faible (diminue de plus que la moitié par rapport à un simple vitrage).

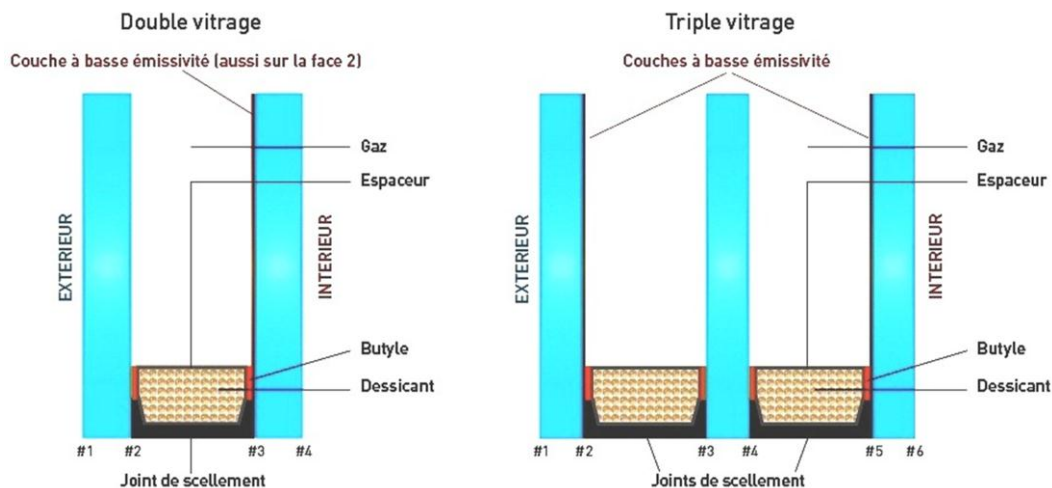


Figure 4 8 Principe du double et triple vitrage (Source : Blossom, 2016)

Avec une troisième, voire une quatrième plaque de verre (Fig. 4.8), le coefficient de transmission U se réduit, et les transmissions lumineuses et solaires diminuent. Cependant, sa problématique réside dans l'augmentation d'épaisseur et du poids du vitrage. C'est pourquoi un ou plusieurs films plastiques sont tendus dans l'espace d'air, de manière à avoir plusieurs lames d'air sans augmenter le poids du vitrage. D'autres types de vitrage permettent de diminuer le facteur solaire, comme le vitrage teinté. Cependant, cela n'affecte pas le coefficient k, et le coefficient de transmission lumineuse descend très rapidement.

4.3.4 Installation de films à contrôle solaire SCF (solar control film):

L'installation de films du contrôle solaire (SCF: solar control films) modifie les propriétés optiques et thermiques du verre, il réduit les gains de chaleur transmis en agissant sur le coefficient de réflexion et d'absorption solaire (Nagahama, 2017), ces films améliorent les

performances thermiques, lumineuses et énergétiques des bâtiments, tout en réduisant l'éblouissement et la pénétration des UV (Pereira, 2019).

Les verres à couches sont élaborés à partir de verre 'float' et revêtus d'un film mince (de 10 à 800 μm) en général composée d'oxydes métalliques, ou un empilement de plusieurs sous-couches pour optimiser sa performances. Le rôle du film est de modifier : le comportement optique du verre dans le domaine visible ou de l'infrarouge le cas : des vitrages antireflet, les vitrages réfléchissants utilisés pour réduire le facteur solaire.

a) Vitrages réfléchissants

Il s'agit en de films minces métalliques qui existent en différentes couleurs (argent, or et bronze) qui s'applique sur un vitrage clair ou teinté pour augmenter le coefficient de réflexion et diminuer le facteur solaire du vitrage, cela est en fonction de son épaisseur, son coefficient de réflexion et de sa position dans la fenêtre.

b) Vitrage à basse émissivité et le verre spectralement sélectif

Comme cela a été évoqué, réduire l'émissivité des fenêtres améliore ses propriétés isolantes cela reste possible en plaçant une couche basse émissivité sur l'une des faces attenante à la couche de gaz du double vitrage. Cette couche bloque une certaine partie de ce mode de transfert de chaleur et diminue le flux total de chaleur au travers de la fenêtre.

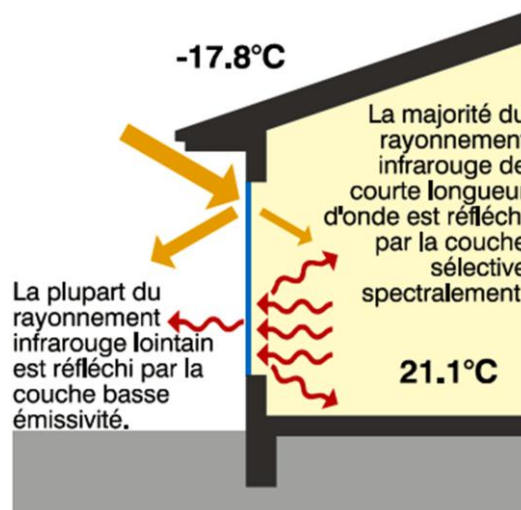


Figure 4 9 Principe d'un vitrage à basse émissivité sélectif (Source : Bodart, 2002).

Des parties du spectre peuvent être rejetées ou laisser passer à travers la modification du coefficient de réflexion spectral de la couche à basse émissivité (Fig. 4.9), c'est le principe du "spectralement sélectif" : maximiser la transmission de la partie visible du spectre solaire et bloquer les ultraviolets aussi bien que les infra rouges de courte longueur d'onde

(NIR) et les infra rouges à grande longueur d'onde qui pourraient être émis depuis l'extérieur.

Les vitrages à basse émissivité sélectifs permettent de limiter les gains solaires en été et autorise d'éclairage naturel.

Le facteur solaire du vitrage est influencé par la position de la couche basse émissivité car elle absorbe aussi une certaine quantité de l'énergie solaire incidente. Cette énergie absorbée est transformée en chaleur, provoquant ainsi un échauffement du vitrage. Lorsque la couche basse émissivité est placée en face 2 voir (Fig. 4.10), la chaleur absorbée par le vitrage et réémise sous forme d'infra rouge de grande longueur d'onde est réémise vers l'extérieur et le facteur solaire du vitrage est diminué.

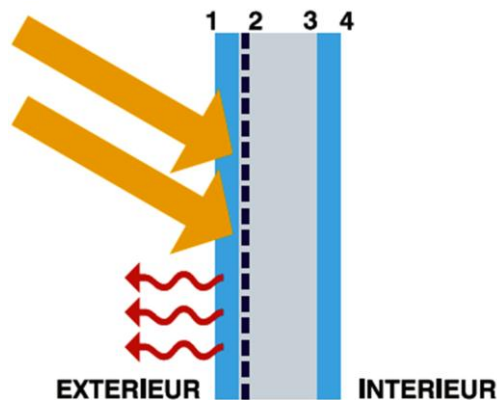


Figure 4 10 La position favorable de la couche basse émissivité pour un climat chaud (Source : Bodart, 2002).

Le vitrage idéal pour l'été : n'a aucune absorption dans le spectre solaire, transparent à la lumière visible et totalement réfléchissant au rayonnement solaire au-delà du $0,7 \mu\text{m}$ et au-dessous du $0,4 \mu\text{m}$ en plus il est transparent aux rayonnements thermiques à grande longueur d'ondes émis de l'intérieur. Le vitrage idéal pour l'hiver : est totalement transparent à l'ensemble du spectre solaire et totalement réfléchissant au rayonnement thermique des surfaces intérieures et extérieures (Ye, 2013).

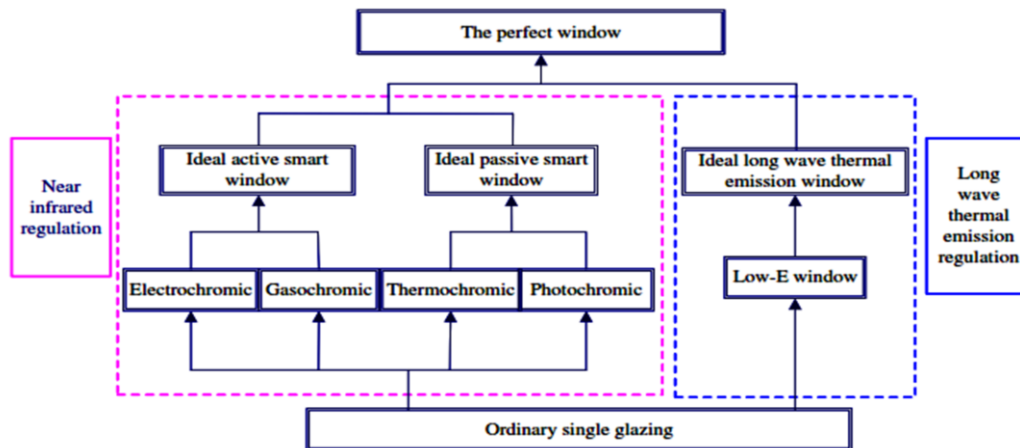


Figure 4 11 Du simple vitrage au vitrage plus efficace en énergie, (Source : Ye, 2013).

Réguler les propriétés optiques du verre dans le domaine infra rouge d'ondes à courte longueur peut être réalisé utilisant les vitrages intelligents :électrochromique, photochromique, thermochromique et gazochromiques (Figure 4.11) ils régulent la transmission de NIR : radiation infra rouge d'ondes à courte longueur d'où il réalise en été la transmission minimale et l'effet du refroidissement par rayonnement maximal et la transmission maximale d'ondes NIR et l'effet d'isolation thermique en hiver. Au parallèle réguler l'émissivité thermique d'ondes à grandes longueur : un vitrage Low-E du type pare-soleil peut diminuer les gains de chaleur dans la pièce en été tandis qu'un vitrage Low-E à transmission élevée peut les augmenter.

4.3.5 État des recherches sur l'optimisation du vitrage :

L'enveloppe du bâtiment et le vitrage en particulier, sont devenues l'objet principal des réglementations et l'innovation scientifique tant pour les nouvelles constructions et la réhabilitation de bâtiments existants (économiques, 2013; DOE, 2014).L'innovation du nanomatériaux mène au développement des systèmes du vitrage intelligent dynamique, du verre adaptatif et actif qui s'adaptent de manière autonome et immédiate aux conditions environnementales et permettent la modulation sélective et dynamique de l'énergie thermique et de la lumière incidente (Casini, 2018).

a) Les Vitrages intelligents dynamiques :

Selon leurs fonctions deux types de systèmes se distinguent : les systèmes passifs autorégulateurs et d'autres actifs et réglables par l'utilisateur. Les systèmes passifs : répondent de manière autonome aux stimuli naturels tel que : le verre photochromique qui

a la capacité de se teinter en fonction de la quantité d'UV qui le traverse, le verre thermochromique et thermotrope dont les propriétés optiques changent automatiquement en fonction de la température. Ils sont capables de répondre à diverses conditions environnementales sans puissance supplémentaire pour fonctionner.

Les systèmes actifs : répondent à un stimulus électrique externe en modifiant leurs caractéristiques optiques, face à des variations des conditions environnementales internes et externes ce vitrage est contrôlable par l'occupant, parmi les innovations du verre dynamique actif le vitrage utilisant les matériaux électrochrome est le plus efficace pour les bâtiments.

Les fenêtres intelligentes ont un impact positif et plus important sur la performance énergétique des bâtiments dans les climats plus chauds et plus ensoleillés (Dussault, 2017 ;Piccolo, 2018). En utilisant ces vitrages, la plupart des économies d'énergie sont dues à une réduction de la demande de refroidissement réduite notamment que la surchauffe est due à la fois au gain de chaleur solaire et aux différences de température entre l'intérieure et l'extérieure (Tällberg, 2019). Cela dépend du l'emplacement, l'orientation, et des propriétés optiques du vitrage (U , g , T_{sol} , T_{vis}) et du type de technologie des fenêtres (vitrage électrochromique ECW, thermochromique TCW et photochromique PCW).

b) Le vitrage Electrochrome adaptatif (ECW) :

Ces vitrages peuvent modifier leurs caractéristiques optiques de transparence et d'adsorption du rayonnement solaire en fonction du besoin des utilisateurs : basculer depuis l'état sombre en état claire par l'influence d'un champ électrique, ce vitrage réduit la transmission de la lumière visible et les radiations infra rouge de courte longueur d'onde à travers la fenêtre (Fig. 4.12).



Figure 4 12 Exemple d'un vitrage électrochrome commercialisé (Tällberg, 2019).

Le verre électrochromique est constitué de cinq couches appliqués sur le vitre (voir la figure 4.13) ; une couche d'accumulation d'électrons (contre-électrode, LiV_2O_5), une couche conductrice ionique (électrolyte, LiAlF_4), une couche d'électrode (généralement le trioxyde de tungstène WO_3 ou le pentoxyde de niobium Nb_2O_5) et deux couches externes en oxyde conducteur transparent (TCO).

Lorsque une tension électrique est appliquée, les ions Li^+ passent de la couche d'accumulation à l'électrode, déterminant un changement de couleur du transparent au sombre dans la couche d'électrode ou dans la couche d'accumulation ou dans les deux selon les matériaux électrochromes employés. Le vitrage est rendu transparent en coupant le stimulus électrique qui déclenche le retournement des ions de l'électrode vers la couche d'accumulation.

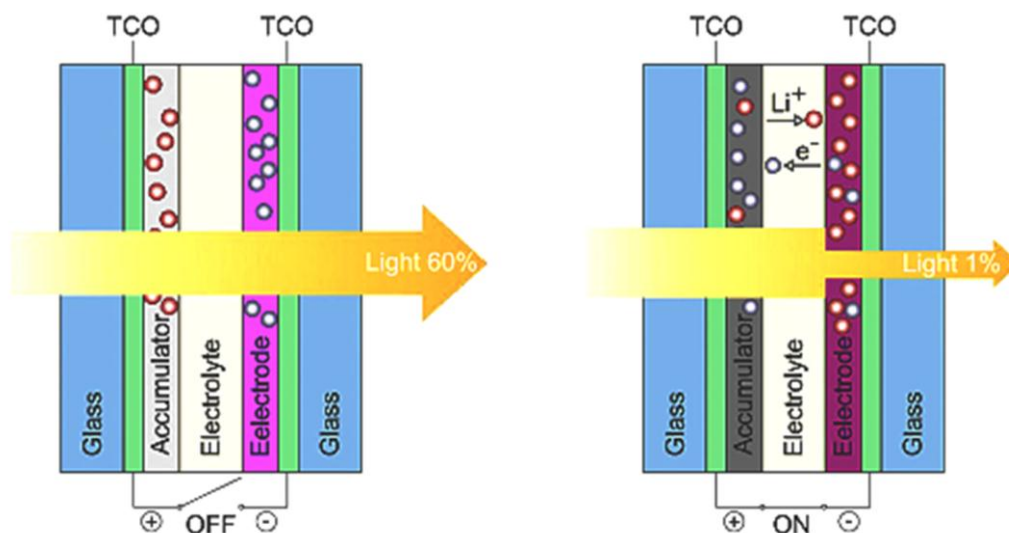


Figure 4 13 Principe de fonctionnement d'un vitrage électrochrome. (Source : Casini, 2018).

Le facteur solaire g est généralement compris entre 0,49 à l'état clair et 0,09 lorsque le verre est complètement teinté avec des valeurs de transmission lumineuse entre 69% à 1% respectivement (Casini, 2018), la commutation entre les différents états de contrôle nécessite une quantité minimale d'électricité 2,5 WP /m² et moins environ 0,4 W/m² pour maintenir un état teinté souhaité.

Le vitrage ECW a la valeur g la plus élevée dans son état le plus clair et la plus faible dans son état le plus sombre. Il laisse entrer la plus grande partie de la chaleur solaire lorsqu'elle est souhaitée et la bloque lorsqu'elle n'est pas désirée, par rapport au vitrage thermochromique qui laisse pénétrer moins de rayons et bloque moins en état le plus sombre. Un vitrage électrochromique, avec une stratégie de contrôle de la température opérative, réduit de 60 à 94% la consommation énergétique par rapport à une fenêtre simple. Il est le plus performant par rapport à d'autres technologies (Tällberg, 2019). Cependant, la plupart des économies d'énergie sont dues à la réduction du refroidissement, tandis que son impact sur la demande de chauffage est relativement faible.

c) Vitrage Thermochromique :

L'utilisation des matériaux thermochrome qui changent de propriétés optiques en fonction de la température sur les verres a permis l'innovation technologique des fenêtres thermochromique dont leurs aspect principale est de réduire la dépense énergétique et l'impact sur l'environnement (Aburas, 2019).

La transmission des infra rouges via le vitrage sont contrôlés par l'usage d'un composé thermochromique le dioxyde de vanadium (VO₂) qui est synthétisé sous forme de revêtement utilisant la technique de pulvérisation magnétron.

Lorsqu'il est chauffé au-dessus de la température de transition 68 °C, le VO₂ subit une restructuration en réseau, qui à son tour modifie sa structure de bande électronique et affecte la conductivité et les propriétés optiques du vitrage (transmission, absorption, réflexion). Par conséquent, l'absorption modifiée de la bande changera la façon dont la lumière interagit avec l'oxyde: d'un état semi-conducteur transparent au-dessous de la température de transition de 68 °C vers un état métallique plutôt sombre ou réfléchissant au-dessus de cette température (Fortier, 2014).

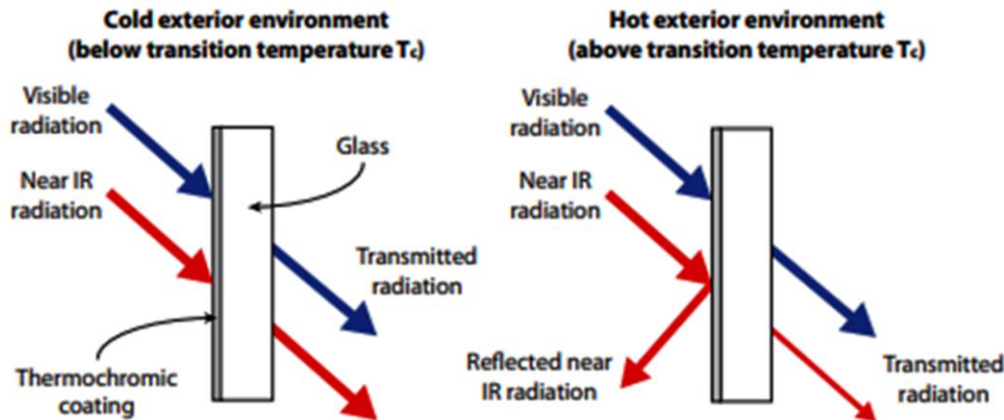


Figure 4 14 Comportement d'un revêtement thermochromique VO2. (Source : Kiri, 2013)

Ce revêtement de dioxyde de vanadium contrôle le rayonnement infra rouge en fonction de la température extérieure comme le montre la figure 4.14, à basse température une forte proportion de rayonnement infra rouge passerait à travers la fenêtre pour chauffer l'intérieur cependant lorsque la température extérieure dépasse la température critique les infra rouges seront en grande partie réfléchis.

Parmi les différents vitrages intelligents, le verre thermochromique ne consomme pas d'énergie ou du gaz supplémentaire pour le changement de performances, il est plus adapté pour une utilisation généralisée au domaine du bâtiment. Pour un vitrage thermochrome (Fig. 4.15), le facteur solaire g est généralement compris entre 0,62 et 0,2 pour l'état le plus clair et entre 0,449 et 0,1 pour l'état le plus sombre (Tällberg, 2019), il transmet jusqu'à 50% d'énergie solaire à l'état claire et une valeur minimale 2% à l'état sombre, sa transmission visuelle varie entre 0,6 et 0,26 pour l'état le plus clair et entre 0,13 et 0,043 pour l'état le plus sombre.

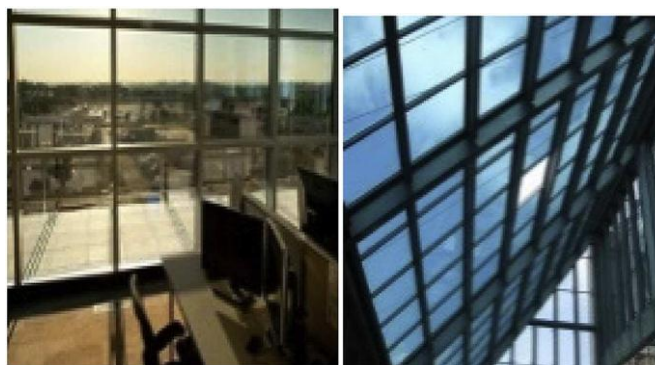


Figure 4 15 Exemple d'un vitrage thermochrome (Tällberg, 2019).

La performance énergétique du vitrage thermochromique (TC) : Plusieurs études scientifiques révèlent que les fenêtres thermo chromiques sont plus adaptées aux climats chauds qu'aux climats froids, car les fenêtres TC passent plus de temps dans leur état sombre. La température du film peut être significativement plus élevée que la température intérieure en raison de l'irradiation solaire intense et de la forte absorptivité (Long, 2015). Le travail de Xu (Xu, 2012) a déclaré qu'avec l'utilisation d'un vitrage à film VO₂, l'énergie de chauffage est augmentée par rapport au verre simple à faible émissivité Low-E dans les zones climatiques plus froides. Cependant, la température de transition (68-28 °C) est trop élevée pour représenter fidèlement les véritables caractéristiques d'ajustement des propriétés optiques en fonction de l'environnement extérieur.

Il se caractérise par une valeur U élevée, avec un coefficient de transfert de chaleur solaire (SHGC) plus bas par rapport à un vitrage Low-E. Il est plus économe en énergie pendant les périodes de refroidissement. Cependant, en hiver, par temps froid, il entraîne une consommation plus élevée de chauffage. Cela s'explique par le fait que le vitrage thermochromique réfléchit davantage de radiations solaires. Lorsque la température intérieure est plus élevée que celle de l'extérieur, il y a une augmentation des pertes thermiques du local en raison de sa valeur U élevée (Xu, 2012).

L'étude de simulation du (Liang, 2018) trouve qu'une température de transition basse (20 °C) au vitrage n'est essentiel pour assurer l'efficacité énergétique du bâtiment, cependant une forte modulation de la transmissivité solaire est plus souhaitable dans la plupart des conditions climatiques. Des progrès scientifiques sont en cours pour explorer les effets de diverse technologie notamment la technologie nanothermochromique et leurs influence sur la performance énergétique, le confort thermique et lumineux dans les bâtiments.

d) La performance énergétique des films de contrôle solaire :

L'effet de l'utilisation des films solaires sur la performance énergétique, thermique et lumineuse des bâtiments est étudié dans la littérature et dans divers contexte climatique :

L'étude du (Chavez-Galan, 2007) évalue les propriétés physiques et le comportement thermique des filtres solaires et films mince à base d'oxydes de fer (FeO). L'étude de simulation menée dans des maisons à différents emplacements au Mexique lui a permis de déterminer les économies d'énergie attribuables suite à l'installation du film sur les fenêtres : ces filtres solaires avaient une transmission visuelle de 30,2% avec 39,9% pour la transmission du spectre proche infra rouge, la réflexion visuelle est 17,5% et 19% sa

réflexion du proche infra rouge NIR. Ils procurent une réduction significative de l'énergie nécessaire au chauffage et au refroidissement, pour les régions à climat chaud, comme Mexicali et Chihuahua une réduction de 16,4% de la consommation totale d'énergie a été observée, par contre des économies d'énergie d'environ 9,1% ont été observées dans des endroits à climat relativement doux comme à Mexico (Chavez-Galan, 2007).

La position du film et son emplacement sur la fenêtre influence sa performance, l'étude de Yin et al (Yin, 2012) démontre que l'application films de contrôle solaire sur un mur rideau d'un bâtiment commercial à Shanghai en Chine diminue 44% du coefficient d'ombrage et du coefficient de

gain de chaleur solaire si le films SCF est appliqué sur le côté extérieur de la fenêtre, alors que la réduction était de 22% si le film était appliqués sur la face interne (Yin, 2012).

L'évaluation thermique et énergétique du SCF (Moretti, 2015) à travers une étude expérimentale et numérique dans deux bureaux similaires en Italie. les resultats de ce travail indique que : pour un bureau doté d'un SCF, le rayonnement solaire a été réduit vers une plage de 46 à 66% durant le printemps sans utilisation de climatisation tandis que la réduction de l'éclairement était assez constante, la température surfacique du verre est diminué de 10 ° C et moins 2 °C pour la température de l'air intérieur du bureau.

Li et al (C. Li et al. 2015) ont mené un travail expérimental et une simulation pour cinq différentes combinaisons entre verre clair ou teinté et l'application films SCF dans trois bâtiments différents (bureau, centre commercial et une chambre d'hôtel) à Hong-Kong en saison estivale chaude. le résultat a démontré que l'application de films sur les simples vitrages claires induit à des températures surfacique intérieur plus élevés dans le verre clair que dans le verre teinté ou feuilleté ; en outre l'augmentation de la température du verre indique une absorption et réflexion solaire plus élevé entraînant moins de rayonnement solaire transmis, les resultats de la simulation dynamique via EnergyPlus montre une réduction significative de la consommation d'énergie par unité de surface des fenêtre avec SCF.

e) La production d'énergie sur le vitrage ou sur les dispositions d'ombrage :

L'étude du (Stamatakis, 2016) évalue les dispositions d'ombrage optimales orientés sud pour intégrer les systèmes PV(photovoltaïque) dans les bureaux en région méditerranéenne de Grèce sur la base d'une analyse multicritère utilisant la méthode PROMETHEE. Treize options de dispositifs d'ombrage ont été examinées par rapport à des critères quantitatifs et qualitatifs: la production d'énergie des panneaux photovoltaïques,

critères d'optimisation énergétique du bâtiment, le confort des utilisateurs, cette analyse inclue un classement reflétant les priorités et les intérêts des groupes économiques et sociaux impliqués dans l'utilisation, la construction de PV, l'étude, le contrôle final (construction et énergie). Ce travail abouti à ce que « les brises solaires en plein façades » est la solution idéale à intégrer les systèmes PV sur la base des critères de production d'énergie photovoltaïque, de confort visuel, thermique et esthétique.

f) L'influence des films en climat méditerranéen :

A travers une approche intégrant la modélisation numérique et l'étude expérimentale, (Pereira, 2019) évalue la performance thermique, lumineuse et énergétique de différents scénarios du système de vitrage entre un cas de vitrage simple et d'autres dotés de films du contrôle solaires. Cette étude explore les films SCF sur le simple vitrage dans le cas des climats méditerranéens tempérés, comme le Portugal (classification climatique Csa et Csb Köppen-Geiger).

Il conclue qu'un verre doté d'un film SCF réduit la température intérieure moyenne en hiver et le double en été, les films SCF augmentent la consommation d'énergie du chauffage et d'éclairage et réduisent la consommation d'énergie du refroidissement notamment les films à faible transmission solaire et à réflexion solaire élevée.

Les caractéristiques thermiques et optiques du vitrage suite à l'application d'un SCF se diffèrent d'un film à l'autre, leur performance énergétique dépend de l'orientation de la fenêtre (N, S, E, O).

Lorsque les trois critères : chauffage, refroidissement, éclairage sont recherchés, un film à coefficient de transmission solaire faible ($\tau_{sol} = 0,22$) et des valeurs moyennes de transmission visuelle ($\tau_{vis} = 0,34$) et réflexion solaire ($\rho_{sol} = 0,46$) convient le plus.

Tandis que pour l'orientation sud il faut diminuer encore la transmission visuelle et solaire ($\tau_{vis} = 0,25$, $\tau_{sol} = 0,18$) et augmenter la réflexion solaire ($\rho_{sol} = 0,54$) à noter que l'application incorrecte du film sur le mauvais côté du vitrage peut compromettre les performances thermiques (Pereira, 2019).

Le travail de (Teixeira, 2020) étudie l'impact d'un vitrage avec SCF (films control solaires) sur le confort thermique, visuel et la performance énergétique et environnementale, dans un campus universitaire situé à Lisbon dans un climat Csa tempéré chaud méditerranéen.

Les résultats indiquent que l'application d'un film à faible émissivité sur la surface interne du vitrage (face à l'environnement intérieur) ne pourrait améliorer les conditions de confort que durant 24% seulement des heures de travail, par contre les performances thermiques du vitrage sont optimisées lorsque le film SCF est appliqué sur la face externe (face à lame d'air) du double vitrage.

Cependant la présence des SCF influence négativement en augmentant les besoins de chauffage et d'éclairage et d'une manière positive en diminuant les besoins de refroidissement, puisqu'ils réduisent les gains de chaleur et la transmission du rayonnement solaire (voir Fig. 4.16). La performance énergétique la plus élevée a été possible avec un film spectralement sélectif ($\tau_{vis}=63\%$, $g=0,40$) il réduit 38% de la consommation annuelle d'énergie et des émissions de CO₂. L'approche d'évaluation multi critère appliquée a révélé que la meilleure alternative est le film le plus réfléchissant pour optimiser le confort thermique et visuel, par contre pour privilégier l'efficacité énergétique et la réduction des émissions de CO₂ le film le plus sélectif spectralement est plus convenable.

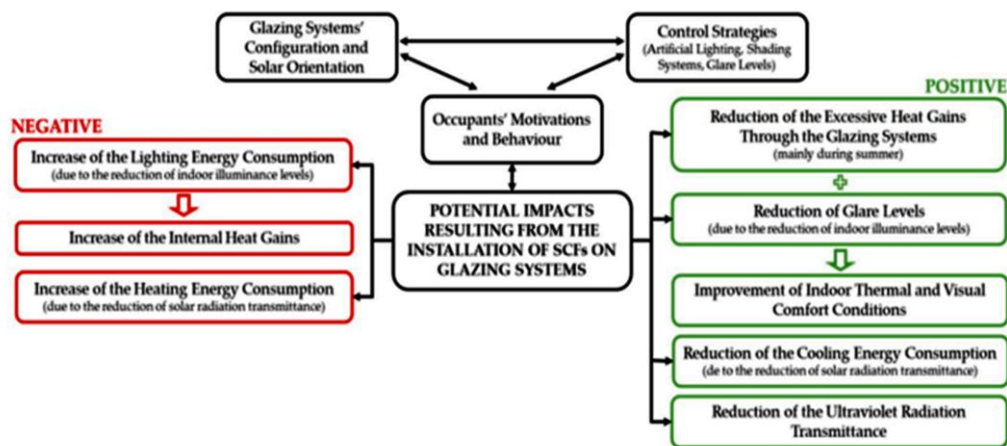


Figure 4 16 L'impact de l'installation de films SCF; source (Teixeira, 2020).

4.3.6 Optimiser la performance des fenêtres et protection solaire en climat méditerranéen le cas Algérien :

Dans le contexte algérien, l'optimisation de la performance énergétique du bâtiment ainsi les facteurs qui affectent la performance des fenêtres a été étudiés par de nombreux auteurs :

L'investigation menée par (Badeche, 2020) évalue l'effet des paramètres de conception de la fenêtre et l'interaction entre eux sur la consommation énergétique, à cet effet le plan expérimental de Taguchi est utilisé pour désigner les conditions expérimentales et réduire le nombre de simulation à quelques essais significatifs et obtenir des résultats fiables. Concernant le climat méditerranéen d'Alger, les paramètres plus importants pour la performance de fenêtre sont : les dimensions de fenêtres, la conductivité thermique du vitrage U_g et du cadre U_f , le coefficient du gain de chaleur solaire (SHGC). Une réduction optimale de la charge énergétique est possible par : SHGC=0.6, le pourcentage de fenêtre entre 10-20%, réduire la conductivité thermique du vitrage $U_g=1 \text{ W/m}^2\text{k}$, les orientations nord et sud sont plus favorable et préconiser les écrans végétales pour les protections solaires(Badeche, 2020).

Imessad et al (Imessad, 2014) ont mené une étude sur la maison pilote construite dans le cadre du projet MED_ENEC sous un climat tempéré méditerranéen d'Alger. Le résultat confirme que la demande énergétique du refroidissement peut être réduit au environ 10 kWh/m²/an avec la configuration de l'enveloppe et la conception d'une masse thermique élevée, une isolation thermique externe des murs et l'intégration des auvents en tant que protection solaire et une ventilation nocturne naturelle de 8 vol/h.

Sur le même cas d'étude, le travail de Ali toudert (Ali-Toudert, 2017) affirme qu'en climat méditerranéen d'Alger, le standard passivhaus a été atteint à travers quelques mesures passives et la demande globale du chauffage et du refroidissement utiles peut être abaissée à 13,3 kWh m².a. Un scénario plus économique pour optimiser les murs et les ouvertures améliore la performance énergétique : un double vitrage à gaz avec une faible valeur $U= 0,86 \text{ W}/(\text{m}^2\text{k})$ et une valeur $g=0,59$, la protection solaire est ramenée à 70%, l'isolation des murs est doublée à 20 cm et l'isolation du plancher est fixée à 15 cm, une masse thermique supplémentaire à 29 cm n'a pas d'influence, la ventilation durant la journée ou la nuit 4 volh⁻¹ peut être atteint au moyen d'une fenêtre ouverte inclinée. Cette optimisation réduit la demande utile de refroidissement à 21,3 kWh /m². a et la demande du

chauffage en $2,4 \text{ kWh m}^{-2} \text{ a}^{-1}$, en outre un système de climatisation active est nécessaire pendant un certain temps à Alger, alors que le besoin de chauffage est quasiment supprimé.

4.3.7 Recommandations pour améliorer les fenêtres :

Sur la base de ces travaux scientifiques sur l'amélioration de la performance énergétique des fenêtres dans un contexte climatique méditerranéen « Csa », quelques caractéristiques de fenêtre et du vitrage sont à retenir essentiellement durant la simulation numérique :

-Un vitrage à basse émissivité sélectif limite les gains solaires en été et autorise l'éclairage naturel.

-Un vitrage à basse émissivité Low-E réduit mieux l'énergie du chauffage en climat froid plus qu'un vitrage du type thermochromique.

L'application de film à control solaire SCF est efficace sur le côté extérieur du vitrage et le choix d'un simple vitrage clair optimise la performance énergétique.

-Un coefficient du gain de chaleur SHGC plus bas réfléchit plus de rayons et une valeur U élevé implique plus de déperdition thermique en hiver.

-La valeur de la réflexion solaire ne soit pas trop élevée et la transmission solaire ne soit pas trop faible et elle dépendra de l'orientation, au sud il faudra réduire le coefficient de transmission solaire $\tau_{\text{sol}} = 0,18$ et augmenter la transmission visuelle $\tau_{\text{vis}} = 0,25$ avec la réflexion solaire $\rho_{\text{sol}} = 0,54$.

-Pour optimiser la performance énergétique et réduire le CO_2 le plus convenable est un film Low-E spectralement sélectif à $\tau_{\text{vis}} = 63\%$ et $g = 0,40$, la conductivité thermique du vitrage $U = 1 \text{ W/m}^2 \cdot \text{k}^{\text{avec}}$ l'utilisation de protections solaires végétales.

-Les fenêtres devraient constituer de 10 à 20% de la façade.

4.4 Systèmes énergétiques intégrés au NZEB dans le contexte méditerranéen

Dans le contexte méditerranéen, l'analyse des cas d'études réels NZEB (Ascione, 2019) montre que l'enveloppe et les fenêtres à hautes isolations sont les stratégies passives les plus utilisées en pratique. Concernant les systèmes actifs, les pompes à chaleur, la ventilation mécanique à récupération de chaleur sont les technologies actives les plus utilisées choisies lors de la conception des bâtiments NZEB. En outre, les systèmes

photovoltaïques et solaires thermiques sont les technologies maintenues pour l'énergie renouvelable.

L'étude de (Causone, 2019) mène une campagne de surveillance et d'évaluation sur une maison passive certifiée Passivhaus située en Sicile d'Italie qui représente un exemple NZEB en climat méditerranéen (voir Figure 4.17) dont il a été conçu comme un living lab, et donc équipé d'un système de surveillance précis permettant de mesurer et d'évaluer les performances énergétiques et environnementales. La haute performance de l'enveloppe opaque et transparente est complétée par une production locale d'énergie renouvelable au moyen de modules PV, un solaire thermique et par EAHE (un échangeur de chaleur sol air) qui assure le préchauffage/pré-refroidissement de l'air ventilé et qui peut ensuite traverser un récupérateur de chaleur avant d'être traité par le serpentin de chauffage / refroidissement et distribué dans les pièces. Une pompe à chaleur air / eau électrique et réversible (puissance nominale : 5,49 kW ; COP : 3,43) dessert le serpentin de chauffage/ refroidissement dans le conduit de ventilation d'entrée principal et un ballon de stockage thermique également alimenté par les PV.



Figure 4 17 Vues sur la maison passive nZEB. (Source : Causone, 2019)

Les résultats de l'expérimentation annuelle sur d'énergie et du confort a montré qu'environ 72% de la consommation énergétique du bâtiment est affectée par les choix et le comportement des occupants, les bâtiments à haute performance peuvent vraiment fonctionner de la manière pour laquelle ils sont conçus, uniquement si les utilisateurs adoptent un comportement bien informé et prudent (Causone, 2019).

Les auteurs du travail (Ascione, 2016) décrivent une approche de conception d'enveloppe afin de produire le meilleur compromis entre les solutions d'enveloppe transparente. La masse thermique du bâtiment et les caractéristiques radiatives de la toiture pour un bâtiment résidentiel NZEB situé dans quatre différentes villes méditerranéennes (Ascione,

2016); les différentes indications de l'enveloppe et d'autres équipements et systèmes HVAC sont utilisés dans le projet italien « SMARTCASE » qui est un bâtiment BNZEB construit au sud d'Italie à Benevento.

L'étude (Ascione, 2019) décrit les principales caractéristiques de l'enveloppe du bâtiment ; les systèmes d'énergie active pour le contrôle microclimatique et la conversion d'énergie à partir d'énergies renouvelables. Les résultats obtenus à travers son évaluation démontrent que ce bâtiment convertit plus d'énergie à partir d'énergies renouvelables par rapport à ses demandes d'énergie, ce qui en fait une maison à énergie positive, l'isolation de l'enveloppe thermique et le comportement dynamique des solutions sélectionnées permettent de minimiser le risque de surchauffe pendant la période estivale et de réduire la demande de refroidissement. Cette configuration BNZEB est une solution appropriée dans d'autres villes méditerranéennes appartenant à la classe Csa de la classification Köppen (Ascione, 2019).

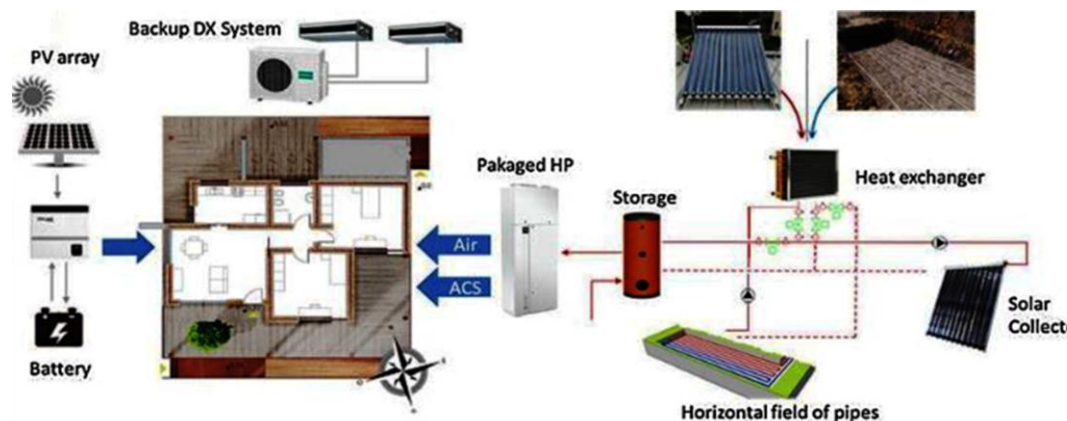


Figure 4 18 Schéma général du système HVAC BNZEB, source (Ascione, 2020).

En détail le système HVAC du BNZEB contient (voir la figure 4.18) : une pompe à chaleur aérothermique qui a été installée avec une puissance de chauffage nominale de 3,18 kW et une puissance de refroidissement de 2,14 kW. Afin d'avoir une capacité de sauvegarde, un système de chauffage / refroidissement supplémentaire a été installé basé sur la technologie d'expansion directe (Ascione, 2020). Des sondes géothermiques horizontales, positionnées à une profondeur de 2,0 m et d'une longueur totale de 100 m sont utilisées pour pré-refroidir le minerai préchauffer l'air de ventilation avant la manipulation dans la pompe à chaleur aérothermique. Un capteur solaire thermique, d'une surface égale à 2,16 m² est installé ainsi qu'un système photovoltaïque avec 16 panneaux en silicium monocristallin.

Les résultats du (Ascione , 2020) montrent ; que le système géothermique du pré-refroidissement de l'air de ventilation, basé sur un échangeur de chaleur sol-eau est capable de réduire la température de l'air de ventilation extérieur jusqu'à plus de 10 ° C par rapport à la température extérieure. Ce système a un potentiel suffisant pour pré-refroidir l'air extérieur en climat méditerranéen et contribue potentiellement à atteindre l'objectif nZEB en référence à l'énergie requise pour le refroidissement des locaux (Ascione, 2020).

L'étude (Stasi, 2020) sur la combinaison des stratégies bioclimatiques avec les systèmes HVAC efficaces pour atteindre les objectifs de construction NZEB en climat méditerranéen, l'auteur examine le bilan énergétique et le confort thermique intérieur d'un immeuble résidentiel dans la région des Pouilles (Italie), à l'aide d'une simulation dynamique horaire d'un cas d'étude réel.

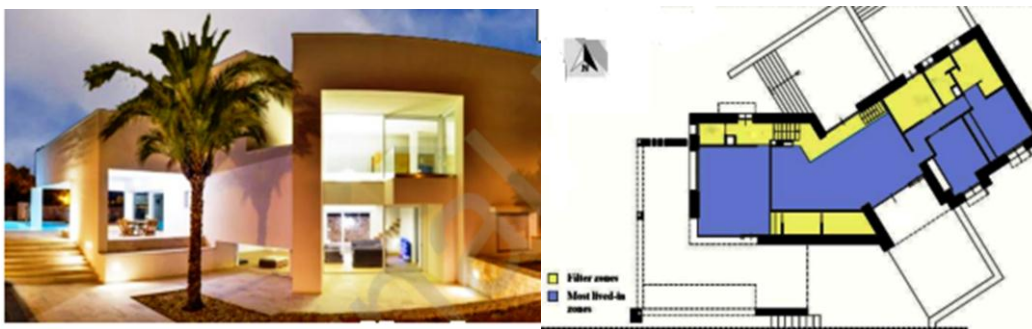


Figure 4.19 Vues sur la villa Magri le cas d'étude du travail (Stasi, 2020).

Ce bâtiment (voir Fig. 4.19) a été conçu selon l'approche intégrée bioclimatique : l'orientation sur l'axe est-ouest et l'exposition sud, la disposition des espaces intérieurs, les écrans solaires horizontaux et verticaux, l'utilisation de couleurs claires pour augmenter le niveau d'albédo, la végétation pour atténuer les effets du vent froid. L'enveloppe du bâtiment est dotée d'une isolation thermique élevée et d'une masse thermique élevée : $U_{\text{mur}}=0,127 \text{ w/m}^2\text{k}$, $U_{\text{toiture}}=0.136 \text{ w/m}^2\text{k}$, $U_{\text{plancher}}=0.223 \text{ w/m}^2\text{k}$, les cadres de fenêtre sont en polychlorure de vinyle (PVC) avec un triple vitrage LowE à vide rempli d'argon d'un coefficient de transmission thermique de 0,8 w/m²k. Cette maison est équipée d'un système HVAC de ventilo-convecteurs alimentés par une pompe à chaleur air / eau et une ventilation mécanique contrôlée (Fig. 4.20), les centrales de traitement d'air sont équipées d'un récupérateur de chaleur à double flux transversal alimenté par un échangeur de chaleur terre-air (EAHX) qui est utilisé pour préchauffer/ pré-refroidir l'air extérieur voir l'unité de traitement d'air sur (Fig. 4.21), la pompe à chaleur fournit également de l'eau chaude sanitaire ECS.

Un contrôleur SMART-MT innovant assure la gestion intégrée du système de chauffage et de la pompe à chaleur et permet à l'utilisateur de personnaliser le confort résidentiel, en fonction des différents besoins et de l'utilisation de sources d'énergie et des terminaux. En plus, de panneaux photovoltaïques (PV) en silicium monocristallin génèrent de l'énergie renouvelable.

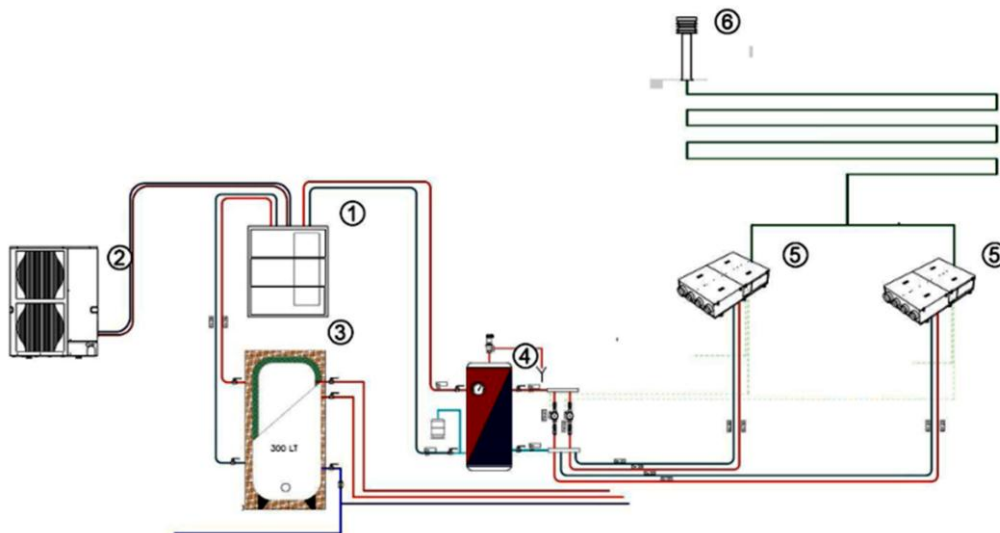


Figure 4 20 Schéma d'installation des systèmes : 1) Pompe à chaleur air-eau, 2) Unité extérieure de la pompe à chaleur, 3) réservoir de stockage ECS, 4) réservoir de stockage inertiel, 5) Unité de climatisation, 6) Échangeur de chaleur Terre-air. Source : (Stasi, 2020).

Les résultats démontrent l'importance de l'analyse des aspects bioclimatiques et des stratégies passives avec l'échangeur de chaleur terre-air, 15,3% d'énergie primaire du chauffage est économisée et 32% pour le refroidissement (Stasi, 2020). L'absence totale de protection solaire en méditerranée génère 82% d'augmentation du refroidissement et une demande remarquable d'électricité provient de la ventilation mécanique.

Ce cas d'étude (Stasi, 2020) suggère l'utilisation mixte de la ventilation hybride dans les bâtiments comme une stratégie d'économiser l'énergie: ventilation mécanique pendant la période de chauffage et MVS combiné avec ventilation naturelle (free cooling) en période de refroidissement.

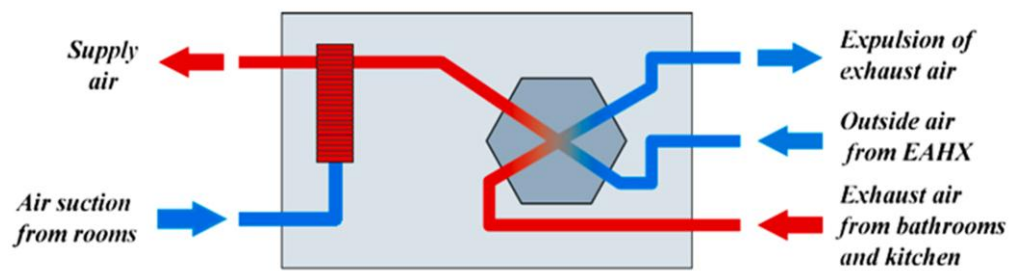


Figure 4 21 Unité de traitement d'air combinée à l'échangeur de chaleur. Source (Stasi, 2020).

CONCLUSION :

Au cours des cinquante dernières années, les projets pilotes de bâtiment durable NZEB réalisés à travers le monde ont mis en évidence les stratégies d'optimisation les plus populaires de l'efficacité énergétique ; l'isolation thermique (murs, planchers, fenêtres), le système VRC ventilation mécanique à récupération de chaleur et pour l'approvisionnement en énergie renouvelable l'utilisation de capteurs solaires thermiques, de panneaux photovoltaïques et les réservoirs d'eau chaude.

Sur les bâtiments Passivhaus, l'enjeu se focalise sur l'efficacité énergétique avec une qualité d'air et l'environnement intérieur favorable, cela peut être réalisé par l'ajustement approprié des systèmes CVC, l'efficacité des échangeurs de chaleur et l'installation de récupération de chaleur et des systèmes de protection solaire, notamment que la VRC dans le cas «Chifley Passive House » réduit la concentration de dioxyde de carbone et fourni de manière adéquate l'air frais.

Le choix de matériaux isolants efficace et écologique est un moyen essentiel de limiter l'impact sur l'environnement, leurs intégration dès la première phase de conception est essentiel pour réduire l'énergie du cycle de vie. L'utilisation de déchets de cuir et de menuiserie et les matériaux traditionnels naturels comme la fibre du bois et le sable sec comme isolants thermique démontre leurs performance énergétique en méditerranée à savoir Casablanca et le sud d'Italie.

La sélection du matériau isolant pour notre cas prendra en compte d'autres facteurs thermo-physiques ; un isolant de faible masse thermique, faible valeur de conductivité thermique, faible facteur de décrémentation, décalage temporel entre 10 à 18 heures, une masse d'accumulation thermique avec une densité élevée.

Les travaux scientifiques menés sur l'influence de film de control solaire en climat méditerranéen indiquent que les films SCF réduisent la consommation d'énergie du refroidissement mais augmentent la consommation d'énergie du chauffage et d'éclairage, cependant un vitrage à basse émissivité Low-E réduit mieux l'énergie du chauffage plus qu'un vitrage du type thermochromique. Les caractéristiques thermiques et optiques du vitrage après l'application d'un SCF dépendent du film et de l'orientation de la fenêtre, un coefficient du gain de chaleur SHGC plus bas réfléchit plus de rayons et une valeur U élevé implique plus de déperdition thermique en hiver. Au sud il faudra réduire le coefficient de transmission solaire $\tau_{sol} = 0,18$ et augmenter la transmission visuelle $\tau_{vis}=0.25$ avec la réflexion solaire $\rho_{sol} = 0.54$.

Un film Low-E spectralement sélectif appliqué sur la face externe de la fenêtre avec : $\tau_{vis}=63\%$ et $g=0.40$, la conductivité thermique du vitrage $U= 1W/m^2k$ réduit la consommation annuelle d'énergie et des émissions de CO₂. En général, un film plus réfléchissant optimise le confort thermique et visuel, par contre un film plus sélectif spectralement améliore l'efficacité énergétique et réduit les émissions CO₂.

Les expériences menées sur les bâtiments NZEB démontrent la performance de certains systèmes énergétiques, le plus représentatif SMARTCASE au sud d'Italie à Benevento, dont le contexte correspond à celui de notre étude.

Pour atteindre la performance énergétique d'un bâtiment NZEB, le système intégré de ventilation, chauffage, climatisation et eau chaude sanitaire doit être composé de plusieurs éléments. Il devrait inclure un système CVC alternatif doté de pompes à chaleur intégrées ou de pompes à chaleur géothermiques équipées d'un échangeur de chaleur terre-eau. De plus, une ventilation à double conduit, desservant une unité centrale qui assure la récupération de chaleur dès la phase de conception, est essentielle. Une unité de récupération de chaleur thermodynamique doit être intégrée dans le système VMC, et l'efficacité peut être améliorée avec l'ajout d'une pompe à chaleur (PAC) réversible. Par ailleurs, l'utilisation de conduites d'air géothermiques et de tuyauterie en zinc est recommandée, car cela contribue à réduire le coût énergétique du refroidissement dans le nord de l'Algérie.

De plus les aspects bioclimatiques et les stratégies passives et protections solaires ainsi le comportement d'occupant producteur complètent la performance des systèmes énergétique. C'est pour cela un cas d'étude optimisé avec l'intégration de ces recommandations a été modélisé et évalué dans la partie suivante.

**CHAPITRE V : ANALYSE DU CONTEXTE CLIMATIQUE
ENERGETIQUE, ENVIRONNEMENTAL DE LA VILLE DE
BEJAIA.**

CHAPITRE V : ANALYSE DU CONTEXTE CLIMATIQUE, ENERGETIQUE, ENVIRONMENTAL DE LA VILLE DE BEJAIA.

Introduction

Ce chapitre vise à explorer le contexte du secteur résidentiel en Algérie et la qualité environnementale. Dans un premier temps, il est question de rappeler la situation et la problématique de l'habitat sur le plan qualitatif et quantitatif, puis le contexte énergétique du secteur résidentiel et ce qui implique sur la qualité environnementale et les émissions des GES

Afin de déterminer les stratégies bioclimatiques efficaces dans ce contexte climatique et les mesures qui affectent le confort thermique, une compréhension précise du climat régional, ses conditions et spécificités est nécessaire. Ces dernières, servant de base à l'élaboration d'un diagramme bioclimatique et de tables Mahoney. Une analyse climatique a été menée tout en définissant les spécificités climatiques de la ville de Bejaia, la partie suivante est consacrée aux diagrammes bioclimatiques. Enfin, la dernière section explore la construction, l'insertion et le traitement des bâtiments dans un contexte de climat tempéré chaud méditerranéen,

5.1 La problématique de l'habitat :

Durant la période de la révolution industrielle, la croissance démographique en ville et le besoin en logement s'élevait, afin de rapprocher les nombreux travailleurs de leur lieu de travail. C'est dans cette période que de graves maladies épidémiques avaient été enregistrées (1832 le choléra fait 18602 victimes à Paris) à cause des conditions insalubres des foyers habités. En plus les deux guerres mondiales ont causé la destruction de plusieurs logements, et afin d'héberger la maximum de famille, de nouvelles formule de bâtiment ont été adopté pour atténuer la crise.

À la suite de réflexions portant sur divers aspects tels que le type de logement, sa superficie, le matériau utilisé, ainsi que les coûts de réalisation, la formule du HBM (habitat à bon marché) a été élaborée. La première initiative majeure en la matière a été prise lors de l'Exposition Universelle de 1889, lors du congrès international des habitations ouvrières, dans le but d'établir une base législative permettant une intervention des pouvoirs publics.

Par la suite, Paris a mis en place des lois concernant les HLM (habitat à loyer modéré) et les HBM, établissant de nouvelles normes pour le logement populaire. C'est dans ce

CHAPITRE V : ANALYSE DU CONTEXTE CLIMATIQUE, ENERGETIQUE, ENVIRONMENTAL DE LA VILLE DE BEJAIA.

contexte que le système des grands ensembles a été initié, en réponse aux besoins massifs engendrés par les ravages de la Seconde Guerre mondiale.

En Algérie, la politique des grands ensembles a été adoptée dans le cadre de la mise en œuvre du plan de Constantine en 1958. Après l'indépendance, sous la pression accrue de la demande de logements, le type d'urbanisme appelé « fonctionnaliste » a été privilégié. Cette approche visait à permettre une construction accélérée en utilisant des procédés de standardisation et de préfabrication. Les zones d'habitat urbain nouvelles, désignées par l'acronyme « Z.H.U.N », se sont répandues sur l'ensemble du territoire national. Actuellement, ces zones connaissent d'importants dysfonctionnements, symbolisés par des nuisances et un délabrement prononcés. Elles se détériorent rapidement, infligeant aux occupants des malaises et des contraintes quotidiennes épuisantes (Farida Naceur et al, 2003).

Pendant et après la colonisation, les responsables algériens ont construit des logements qui ne tenaient pas suffisamment compte des préférences de la population. Dès l'acquisition du logement, les habitants ont apporté des modifications pour le rendre conforme à leurs besoins découlant de la vie urbaine (Arbaoui, 1989). Aujourd'hui, le parc immobilier existant ne remplit souvent qu'une fonction basique de logis, transformant ainsi la crise de l'habitat en une crise du logement (Meghraoui, 2004).

Pourtant, l'habitat est un concept d'une portée très large, constituant la base de plusieurs disciplines telles que l'ethnologie, la sociologie, la géographie humaine, et l'histoire (De Radkowski, 2002). Il représente le mode d'organisation et de peuplement par l'homme de l'environnement dans lequel il vit. Cet ensemble comprend non seulement les logements, mais également divers éléments tels que les voies, les jardins, les parkings, les espaces réservés aux piétons, les marches, les bancs, les terrains de jeux et les fontaines.

5.1.1 La Crise du logement et les facteurs d'influence

La demande et le besoin en logement sont en progression continue avec la croissance démographique, il y a un déséquilibre entre l'offre et la demande du logement, cela est à l'origine de plusieurs lacunes : du fait que ces besoins n'ont pas été traité progressivement pour des raisons historiques, et économiques (par le faible budget consacré pour ces projets), ajoutant les délais de la réalisation des constructions. Plusieurs chercheurs ont défini cette situation par une crise : sur un niveau quantitatif : l'incohérence entre l'offre et

CHAPITRE V : ANALYSE DU CONTEXTE CLIMATIQUE, ENERGETIQUE, ENVIRONMENTAL DE LA VILLE DE BEJAIA.

la demande et le retard durant la réalisation des plans nationaux, et sur le niveau qualitatif : le fait que plusieurs aspects ont été négligés : l'aspect social, culturel, historique et physique du contexte ainsi que les aspirations des utilisateurs (Alkama et Zerouala. 1997).

En plus, cette demande accrue du logement a dynamisé la production de logement, et le secteur du bâtiment en générale est devenu un vecteur de croissance, cependant cette évolution est faite au détriment de la qualité et les normes de performance énergétique et environnementales n'ont pas été intégrées dans le processus de conception et de construction.

Face à cette situation, la notion du confort thermique, et les conditions climatiques ne sont pas considérés dans la conception des bâtiments, et afin de réadapter le bâtiment aux conditions climatiques et atteindre le confort, les utilisateurs font recours aux systèmes actifs (chauffage et climatisation), ce qui a entraîné une augmentation de la consommation d'énergie, enregistrée surtout dans le secteur résidentiel.

5.1.2 Les facteurs d'influence :

Plusieurs facteurs contribuent aux problèmes liés au logement : l'exode rural qui a eu pour résultat une forte urbanisation anarchique et la concentration de la population dans les grands centres urbains, et l'accroissement de la population à un rythme qui ne correspond plus à celui de l'activité de la construction, en conduisant à la surpopulation et la dégradation rapide du cadre bâti. En réalisant les logements sous l'urgence, l'Algérie a adopté l'urbanisme opérationnel et l'industrialisation des villes a été recherchée sans une étude au préalable, toute en négligeant l'aménagement du territoire en deuxième plan. (MEZRAG. 2015)

5.2 Le contexte énergétique du bâtiment résidentiel :

5.2.1 La consommation d'énergie :

La consommation d'énergie finale s'établit à 50,2M Tep en 2021 (MEA, 2021), elle a été tirée par la hausse de la consommation de pratiquement l'ensemble des produits énergétiques, essentiellement l'électricité et le gaz naturel.

L'évolution de la consommation finale par produit et par secteur d'activité est détaillée :

CHAPITRE V : ANALYSE DU CONTEXTE CLIMATIQUE, ENERGETIQUE, ENVIRONNEMENTAL DE LA VILLE DE BEJAIA.

□ **Par produit :** L'évolution de la consommation finale par produit fait ressortir ce qui suit (voir la Figure 5.1) :

- Hausse appréciable de la consommation finale d'électricité (12,7%), passant de 13,6 M Tep en 2020 à 15,3 M Tep en 2021,
- Hausse de la consommation finale du gaz naturel (6,5%) à 17,9 M Tep en 2021, tirée par l'accroissement de la consommation des clients de Sonelgaz, dont ceux du secteur des ménages (5,1%) et clients industriels (10,9%).
- Hausse (4,2%) de la demande en produits pétroliers sur le marché national pour s'établir à 13,7 M Tep en 2021 contre 13,1 M Tep en 2020. La hausse a concerné plus particulièrement, les carburants terre (essence, gasoil et GPL/C).

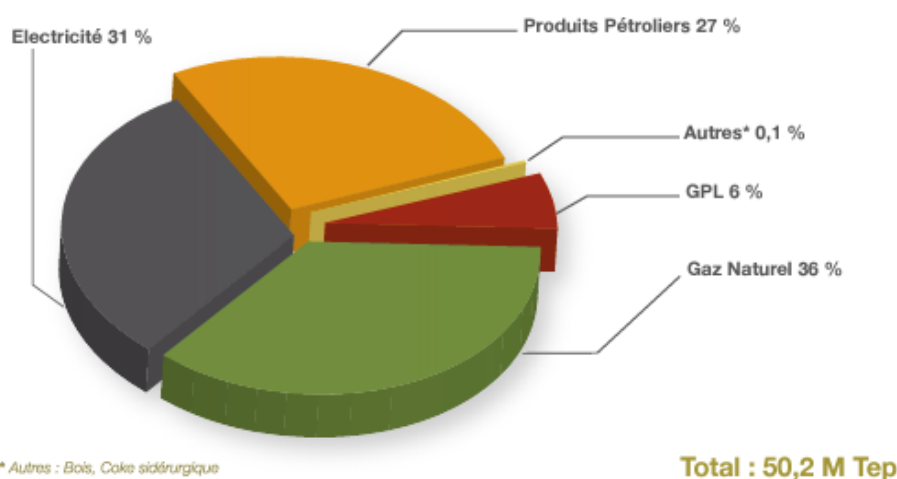


Figure 5. 1 Structure de la consommation finale par produit. Source (MEA, 5051)

□ **Par secteur d'activité :** La consommation finale de 2021 a été caractérisée par les évolutions suivantes :

- Hausse de la demande du secteur des «Ménages et autres» (6,2%) passant de 22,1 M Tep en 2020 à 23,4 M Tep en 2021, tirée par le sous-secteur résidentiel (4,4%) et le sous-secteur Tertiaires et autres (12,3%) ;
- Reprise de (7,6%) de la consommation du secteur des "transports", qui est passée de 13,5 M Tep en 2020 à 14,5 M Tep en 2021, tirée par celle des carburants terre et aérien ([gasoil 5,1%), (GPL/C 35,8%), essences (1,8%), (jet 15,1%)], en corrélation avec la reprise du transport routier et l'ouverture graduelle de l'espace aérien ;
- Hausse appréciable (12%) de la consommation du secteur «Industries et BTP» à 12.2 M Tep en 2021, en rapport avec la reprise de l'activité économique, tirée notamment

CHAPITRE V : ANALYSE DU CONTEXTE CLIMATIQUE, ENERGETIQUE, ENVIRONNEMENTAL DE LA VILLE DE BEJAIA.

par les sous-secteurs ISMME, industries Agroalimentaires, Chimie et matériaux de construction.

La consommation des "ménages et autres" qui est le secteur qui inclut le secteur résidentiel tertiaire avec le secteur de l'agriculture, est le secteur le plus demandeur d'énergie avec 47% de la consommation finale. Sous l'effet de la conjonction de plusieurs facteurs notamment, le développement démographique, le nombre important de logements livrés ainsi que l'accroissement du nombre des clients de Sonelgaz à près de 11,0 millions d'abonnés en 2021, et par conséquent une hausse des besoins en électricité ;

La Figure 5.2 illustre la structure de la consommation finale par secteur d'activité.

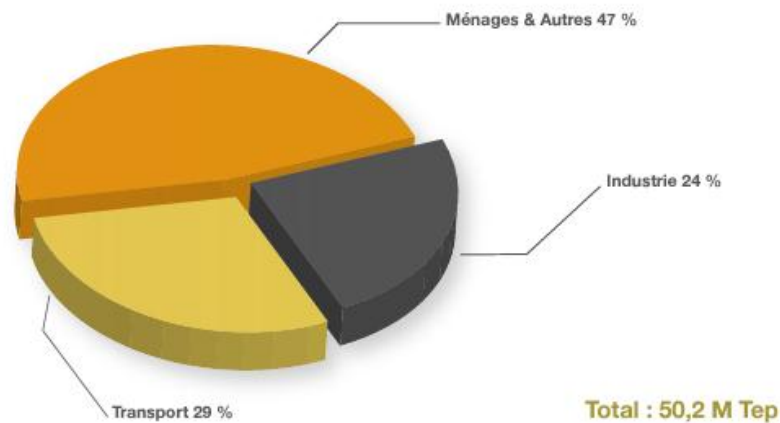


Figure 5. 2. Structure de la consommation finale par secteur d'activité. Source : (MEA, 5051)

En plus, l'évolution des consommations d'énergie par secteur d'activité sur la période 2000-2015 a montré que la consommation finale a crue avec un tcam de 4.4%/an, et le secteur résidentiel (7.4%/an) est le secteur où la consommation d'énergie a crû le plus rapidement [APRUE, 2017], il ressort que le secteur résidentiel et celui des services en Algérie consomment plus de 40 % du total de l'énergie, tous secteur confondus. En outre, d'après les projections de référence de l'observatoire méditerranéen de l'énergie (OME), la consommation d'électricité a plus que triplé au cours de ces dernières décennies et cette situation se poursuivra d'ici 2025. Cette consommation exprime, que le domaine du bâtiment présente un véritable potentiel d'amélioration à la fois dans le domaine énergétique et Environnemental, et le secteur des ménages et autres constitue une priorité dans l'élaboration de la stratégie et des programmes de maîtrise d'énergie (SEMAHI. 2013).

5.2.2 La consommation énergétique dans le secteur résidentiel :

La consommation finale du secteur résidentiel a atteint 10,5 millions de TEP en 2015, dont sa répartition par type d'énergie et par type de logement est représentée dans la Figure 5.3 et la Figure 5.3 respectivement.

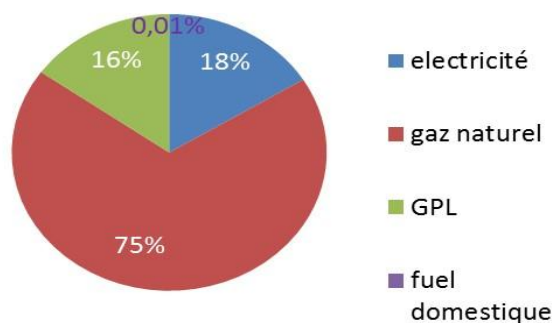


Figure 5. 3. Répartition de la consommation du secteur résidentiel par type d'énergie. (APRUE- Edition 2017).

La consommation d'électricité du secteur résidentiel a atteint 1690 KTEP. Elle représente 40 % de la consommation totale d'électricité et atteint 8756 KTEP en produits gazeux soit 60% de la consommation totale des produits gazeux.

Il représente, de ce fait, le premier secteur grand consommateur d'énergie électrique au niveau national. Le logement individuel est responsable du 94% de la consommation finale du secteur résidentiel par rapport au logement collectif qui représente que 6% voir la Figure 5.4.

D'autres informations sont utiles :

- Le parc construit est de 7.748.154 dont 70 % urbain.
- Le taux d'occupation est en moyenne de 5.2 personnes par logement.
- Le taux d'équipement moyen ménage est de 75%.
- Taux d'électrification national est de 99%.
- Taux de ménages raccordés au réseau gaz naturel est de 54%.
- La consommation énergétique moyenne d'un logement est 1,530 Tep/an.

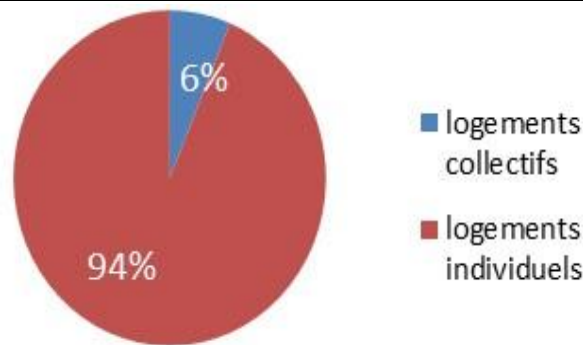


Figure 5. 4. Répartition de la consommation du secteur résidentiel par type de logement. (APRUE- Edition 2017).

5.3 La qualité environnementale du Bâtiment :

Au niveau mondial, le secteur résidentiel-tertiaire est le principal émetteur de gaz à effet de serre (GES), avec des émissions s'élevant à 7 Gt de CO₂ dans les pays en développement (Carole-Anne, 2008).

La consommation énergétique finale en Algérie entraîne des émissions de gaz à effet de serre (GES) qui ont atteint 96 millions de tonnes de CO₂ en 2015, soit : un niveau d'émissions par habitant de 2.4 TCO₂.

-un niveau d'émissions de 2,4 tonnes de CO₂ par tonne équivalent pétrole (tep) consommée.

-un niveau d'émissions de 7,1 tonnes de CO₂ par million d'unités monétaires ajustées (MDA) produites

Sur le bilan des émissions de gaz à effet de serre représenté dans la Figure 5.2, le secteur des transports est le plus grand émetteur, contribuant à hauteur de 46 % des émissions totales, suivi du secteur du bâtiment avec 32 %, et en troisième position, le secteur de l'industrie avec 13 % [APRUE, Édition 2017].

CHAPITRE V : ANALYSE DU CONTEXTE CLIMATIQUE, ENERGETIQUE, ENVIRONNEMENTAL DE LA VILLE DE BEJAIA.

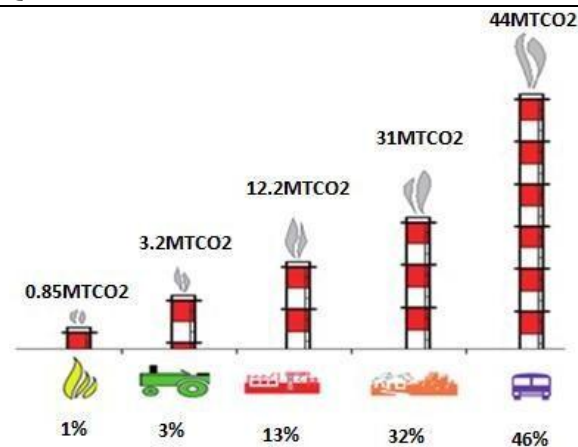


Figure 5. 5. Bilan des émissions de GES par secteur, an 2015 en Teq CO2 (APRUE, 2017)

Dans le cadre de l'engagement du Protocole de Kyoto et de l'accord de la COP 21 visant à réduire les émissions de gaz à effet de serre (GES), la réalisation de cet objectif passe par la diminution de la consommation d'énergie fossile, principal contributeur à ces émissions, ainsi que par l'optimisation de la consommation d'énergie. Cela peut être réalisé en améliorant l'efficacité énergétique du secteur du bâtiment et en faisant appel à d'autres types d'énergies plus propres et renouvelables, constituant ainsi une solution aux problèmes de réduction de l'énergie et du réchauffement climatique.

L'énergie joue un rôle central dans la problématique du changement climatique. La production d'énergie et la consommation d'énergie finale dans le secteur du bâtiment, notamment pour la climatisation, le chauffage et la production d'eau chaude, contribuent à l'augmentation de la teneur en CO2 dans l'atmosphère.

Parmi les réformes entreprises dans le secteur énergétique par le gouvernement algérien, figure l'adaptation du cadre institutionnel de la maîtrise de l'énergie à la nouvelle donne économique et politique. L'Agence Nationale pour la Promotion et la Rationalisation de l'Utilisation de l'Énergie (APRUE) et le Centre de l'Information sur l'Énergie (CIME) sont mandatés pour élaborer une stratégie nationale de maîtrise de l'énergie. La législation sur la maîtrise de l'énergie embrasse trois dimensions : l'utilisation rationnelle de l'énergie, le développement des énergies renouvelables et la protection de l'environnement contre les effets néfastes du système énergétique.

CHAPITRE V : ANALYSE DU CONTEXTE CLIMATIQUE, ENERGETIQUE, ENVIRONMENTAL DE LA VILLE DE BEJAIA.

La politique énergétique visant à améliorer l'efficacité énergétique dans le secteur du bâtiment se manifeste par la conception d'un programme prévoyant la réalisation de 600 logements à haute performance pour la période 2010-2014.

Dans plusieurs pays du monde tels que le Canada, les États-Unis, la France et l'Algérie, le secteur résidentiel connaît une expansion significative, exerçant un impact notable sur l'économie et l'environnement en raison de ses demandes spécifiques en matière d'énergie. Les besoins énergétiques du secteur résidentiel sont principalement attribuables au chauffage et à la climatisation, mais englobent également d'autres postes de consommation tels que l'eau chaude sanitaire, la cuisson, et l'électricité spécifique (bureautique, appareils ménagers, éclairage) (BOURSAS, 2013).

Il est impératif pour l'Algérie d'adopter de nouvelles stratégies axées sur la rationalisation de la consommation énergétique, en mettant particulièrement l'accent sur le secteur du bâtiment. Ainsi, l'efficacité énergétique, l'intégration des énergies renouvelables et la réduction des émissions de gaz à effet de serre représentent un défi majeur à relever dans ce domaine. Le secteur du bâtiment présente un potentiel considérable en termes d'économie d'énergie, contribuant ainsi de manière significative à la réalisation de cet objectif.

5.4 Les parties prenantes principales et la stratégie nationale de la maîtrise d'énergie :

Pour rationaliser l'utilisation de l'énergie, l'Algérie a mis en place un plan législatif et réglementaire composé des éléments suivants :

- La loi n° 99-09 du 28 juillet 1999 relative à la maîtrise de l'énergie, accompagnée du décret exécutif n° 2000-90 adopté en avril 2000, qui concerne la réglementation thermique des bâtiments neufs. Ce décret exige la mise en œuvre de conditions de performances minimales lors de la conception et de la construction de bâtiments neufs, notamment en ce qui concerne les caractéristiques d'isolation thermique, ainsi que les valeurs de référence relatives aux déperditions et aux apports calorifiques pour les bâtiments neufs. Ces dernières sont spécifiées dans des documents techniques réglementaires (D.T.R) approuvés par arrêté du ministre chargé de l'habitat : DTR C3.2 du 10/12/97, DTR C3.4 du 18/08/98 et DTR C3.3.1 du 14/11/05), élaborés par le Centre National d'Études et Recherches Intégrées du Bâtiment (CNERIB) et promulgués par arrêtés ministériels.

CHAPITRE V : ANALYSE DU CONTEXTE CLIMATIQUE, ENERGETIQUE, ENVIRONMENTAL DE LA VILLE DE BEJAIA.

- La loi n° 04-09 du 14 août 2004 relative à la promotion des énergies renouvelables dans le cadre du développement durable
- Le décret exécutif n° 04-149 du 19 mai 2004 fixant les modalités d'élaboration du programme national de maîtrise de l'énergie.

5.4.1 Réglementation Thermique Algérienne :

La réglementation thermique algérienne actuellement en vigueur a été détaillée dans les DTR C3.2/4 (Annexe B). Ce document constitue une base de données et fixe les méthodes de détermination des déperditions et des apports calorifiques des bâtiments. Une partie a été consacrée à la vérification de la conformité des bâtiments vis-à-vis de la réglementation thermique, à travers des seuils à ne pas dépasser appelés « déperditions de référence » et « apports de référence » :

- La vérification réglementaire d'hiver consiste à calculer les déperditions par transmission DT en (W/°C) du logement et les déperditions de référence Dref en (W/°C) et assurer que :

$DT \leq 1.05 * D \text{ ref} \text{ [W/°C]}$, d'où $D \text{ ref} = a.S1 + b.S2 + c.S3 + D.S4 + e.S5$ (DTR .C 3-2).

(a, b, c, d, e) représentent les coefficients de transmission thermique des différentes parois (respectivement le toit, le plancher, les murs, porte et fenêtres). S1, S2, S3, S4, S5 représentent la surface de ces parois.

- La vérification réglementaire durant l'été consiste à calculer les apports de références Aref en (W) et la somme des apports calorifiques par les parois opaques aériennes APO en (W) et les apports calorifiques par les parois vitrés AV en (W) en mois de juillet à 15 hr pour une température sèche intérieure de 27°C et assurer que :

$APO (15hr) + AV (15hr) \leq 1.05 * Aref \text{ [W]}$ (DTR .C 3-4).

De plus, à l'échelle internationale, les Grenelles et les normes de performance énergétique, tels que le label Passivhaus, le label Minergie® et la Réglementation Thermique Française 2012, imposent la réduction de la consommation énergétique et des émissions de gaz à effet de serre au niveau des bâtiments. Cette démarche s'inscrit dans un cadre réglementaire contraignant, nécessitant l'obtention d'une certification délivrée par le Label, une fois que plusieurs exigences ont été satisfaites conformément aux normes applicables au bâtiment.

CHAPITRE V : ANALYSE DU CONTEXTE CLIMATIQUE, ENERGETIQUE, ENVIRONMENTAL DE LA VILLE DE BEJAIA.

Ces standards prévoient des limites de consommation énergétique annuelle, ainsi que d'autres exigences et recommandations spécifiques au bâtiment, contribuant ainsi à une réduction progressive de leur consommation énergétique.

5.4.2 La stratégie nationale de la maîtrise d'énergie

Dans le prolongement de l'esprit de la loi sur la maîtrise de l'énergie, plusieurs instruments clés ont été instaurés par les autorités publiques en faveur de la maîtrise de l'énergie, notamment le Programme National de Maîtrise de l'Énergie (PNME), le Fonds National pour la Maîtrise de l'Énergie (FNME), le Comité Intersectoriel de la Maîtrise de l'Énergie (CIME) et l'Agence Nationale en charge de la Maîtrise de l'Énergie (APRUE). La Figure 5.6 schématise ces dispositifs.

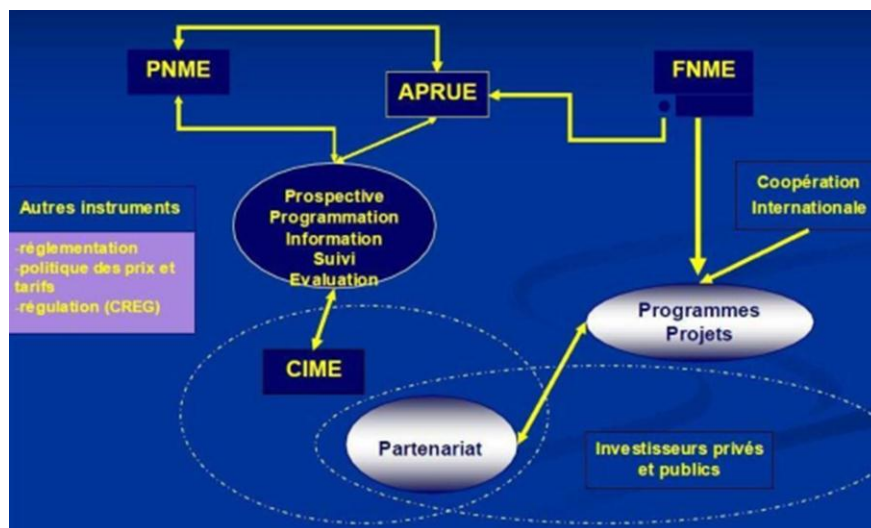


Figure 5. 6. Dispositifs nationale de la maîtrise de l'énergie. (APRUE, 2011).

En plus des ministères impliqués dans la promotion de la maîtrise de l'énergie et le développement des énergies renouvelables, plusieurs institutions publiques spécialisées ont été créées pour mettre en œuvre cette politique dans le cadre du développement durable national. Il s'agit du CNERIB, du CDER, du CNTTP, et de l'ANDI. Ces organismes sont définis par des textes réglementaires de la loi sur la maîtrise de l'énergie.

5.4.3 Le Programme National de Maîtrise de l'Énergie (PNME) :

Le PNME est élaboré en conformité avec les grandes orientations de la politique de développement économique et social du Gouvernement, reposant sur des études prospectives énergétiques à moyen et long termes. Ces études permettent de définir les enjeux et les potentiels de la maîtrise de l'énergie pour chacun des secteurs d'activités

CHAPITRE V : ANALYSE DU CONTEXTE CLIMATIQUE, ENERGETIQUE, ENVIRONMENTAL DE LA VILLE DE BEJAIA.

économiques. Le PNME énonce les orientations, les objectifs et les principaux moyens de sa mise en œuvre, fournissant ainsi le cadre dans lequel les partenariats entre les acteurs économiques et sociaux, ainsi que les opérateurs publics et privés, seront déployés.

5.4.4 Le Fonds National pour la Maîtrise de l'Énergie (FNME) :

Le Fonds national pour la maîtrise de l'énergie (FNME), dont l'ordonnateur est le Ministre chargé de l'énergie, est l'instrument public spécifique d'incitation financière de la politique de maîtrise de l'énergie. Alimenté par une taxe affectée et par conséquent indépendant du budget de l'Etat, il doit favoriser la continuité des moyens de cette politique.

5.4.5 Le Comité Intersectoriel de La Maîtrise de l'Énergie (CIME) :

Le CIME est un organe consultatif placé auprès du ministre de l'énergie chargé d'organiser la concertation et le développement du partenariat public/privé. Il émet des avis sur :

- ❖ Toute question liée à l'évolution de la politique de maîtrise de l'énergie et des moyens qui lui sont consacrés.
- ❖ Les travaux d'élaboration, de mise en œuvre et de suivi du Programme National de Maîtrise de l'Énergie.

5.4.6 L'Agence Nationale pour la Promotion et la Rationalisation de l'Utilisation de l'Énergie (APRUE) :

Dans le cadre de la stratégie nationale de maîtrise de l'énergie, l'Agence Nationale pour la Promotion et la Rationalisation de l'Utilisation de l'énergie (APRUE) est chargée de l'animation de la politique nationale de maîtrise de l'énergie. Il s'agit d'un établissement public à caractère industriel et commercial créé par décret présidentiel en 1985, placé sous la tutelle du Ministère de l'Énergie. Sa mission principale consiste à mettre en œuvre la politique nationale de maîtrise de l'énergie, en se focalisant sur la promotion de l'efficacité énergétique (l'APRUE, 2015).

Dans le contexte de la loi n° 99-09 du 28 juillet 1999 relative à la maîtrise de l'énergie, l'agence a pour missions :

- La coordination et l'animation de la politique nationale de maîtrise de l'énergie.
- La mise en œuvre et le suivi du Programme National de Maîtrise de l'Énergie (PNME).

CHAPITRE V : ANALYSE DU CONTEXTE CLIMATIQUE, ENERGETIQUE, ENVIRONMENTAL DE LA VILLE DE BEJAIA.

- La sensibilisation et la diffusion de l'information sur la maîtrise de l'énergie en direction des différentes cibles (grand public, professionnels, milieu scolaire...).
- Le montage de programmes et de projets sectoriels en partenariat avec les secteurs concernés (Industrie, Bâtiment, Transports, ...)

Sur le plan législatif, le dispositif réglementaire initial pour l'efficacité énergétique dans l'habitat est le document technique réglementaire (DTR), lancé par le ministère de l'Habitat et de l'Urbanisme en 1997. Ce document, ultérieurement approuvé par le ministre de l'Énergie et des Mines, établit les valeurs de référence pour les déperditions et les apports calorifiques des bâtiments neufs destinés à un usage d'habitation et tertiaire. Il précise également les méthodes de calcul des déperditions, les valeurs limites pour le climat intérieur des locaux, ainsi que les zones climatiques.

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

a) Programme Eco-Bat :

Le développement futur du parc de logements entraînera une augmentation significative de la consommation énergétique. Afin de maîtriser cette consommation dans le secteur résidentiel, un programme a été initié, impliquant la construction de 600 logements à haute performance énergétique répartis dans différentes zones climatiques. Ce projet intègre des considérations de confort thermique et d'économie d'énergie à travers des choix architecturaux, des matériaux de construction et des détails de mise en œuvre. Le programme Eco-bât vise à améliorer le confort thermique des logements tout en réduisant la consommation énergétique liée au chauffage et à la climatisation. Sa réalisation résulte d'un partenariat entre l'Office de Promotion et de Gestion Immobilières (OPGI), l'Agence Nationale de Promotion et de Rationalisation de l'Utilisation de l'Énergie (APRUE) et le Fonds National de Maîtrise de l'Énergie (FNME).

b) Programme triennal d'efficacité énergétique «2011-2013» :

Ce programme vise à promouvoir une utilisation plus responsable de l'énergie et à explorer des approches pour préserver les ressources et favoriser une consommation optimale. L'Agence Nationale pour la Promotion et la Rationalisation de l'Utilisation de l'Énergie (APRUE) est chargée de sa mise en œuvre, notamment à travers des projets d'isolation

CHAPITRE V : ANALYSE DU CONTEXTE CLIMATIQUE, ENERGETIQUE, ENVIRONMENTAL DE LA VILLE DE BEJAIA.

thermique des bâtiments neufs et la réhabilitation thermique des logements existants. Ces initiatives ont pour objectif de réduire la consommation d'énergie liée au chauffage et à la climatisation des logements d'environ 40% (APRUE, 2011). L'efficacité énergétique est également encouragée par l'adoption de lampes à basse consommation d'énergie et l'introduction de techniques de climatisation solaire.

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

Le Programme National d'Efficacité Énergétique (PNEE), lancé en 2016 en vertu de la loi n° 99-09 du 28 juillet 1999 relative à la maîtrise de l'énergie, a pour objectifs l'isolation thermique de 100 000 logements par an, la distribution de 10 millions de lampes à basse consommation et la conversion de 1,3 million de véhicules au GPL d'ici 2030. Ce programme vise à réduire la croissance de la consommation d'énergie, offrant une visibilité aux investisseurs. Doté d'un budget de 900 milliards de DA, dont 54% sont financés par l'État, le PNEE permettra à l'Algérie d'économiser 93 millions de TEP, de réduire les émissions de CO₂ de 200 millions de tonnes, et de créer près de 180 000 emplois d'ici 2030. Dans le secteur du bâtiment, le programme prévoit l'isolation thermique de 100 000 logements par an, engendrant des économies d'énergie sur 30 ans. Pour le secteur résidentiel, le PNEE encourage l'adoption de pratiques et technologies innovantes, favorisant l'utilisation d'équipements économes tels que chauffe-eau solaires et lampes économiques, visant à améliorer le confort intérieur tout en réduisant la consommation d'énergie. La mise en place d'une industrie locale d'isolants thermiques et d'équipements performants constitue un atout majeur pour le développement de l'efficacité énergétique dans ce secteur (CDER. 2015).

❖ La coopération internationale :

La coopération internationale constitue une expérience pour l'élaboration et le pilotage des programmes de la maîtrise de l'énergie, par la mise à disposition de l'expertise internationale et de transfert de savoir-faire aux cadres-ingénieurs de l'APRUE.

❖ Le projet CES- MED :

Le projet CES-Med "Cleaner and Energy Saving - Mediterranean Cities" est une initiative financée par l'UE destinée à fournir une assistance technique et de formation aux autorités locales et nationales de la région de la rive sud du bassin méditerranéen afin de les aider à répondre plus activement les défis politiques durables. Cet effort consiste également à sensibiliser la population locale aux politiques locales durables, au partage des

CHAPITRE V : ANALYSE DU CONTEXTE CLIMATIQUE, ENERGETIQUE, ENVIRONMENTAL DE LA VILLE DE BEJAIA.

connaissances et à l'établissement de partenariats durables entre les autorités locales de l'UE et de la région IEVP Sud (CES-MED : <http://ces-med.eu/>).

Ce projet rentre dans le cadre des actions de coopération internationale initiées par le gouvernement algérien avec la commission européenne pour lequel l'APRUE a été désignée comme point focal. En Octobre 2013, trois(03) communes pilotes du projet CES MED (Batna, Boumerdes et Sidi Bel Abbas) ont été nommées par la Direction Générale des Collectivités Locales (APRUE, 2015).

Les objectifs du projet sont :

-D'une part de réduire la consommation énergétique et les émissions carbone au niveau de la municipalité et d'inscrire cette logique dans une vision du développement de la ville.

- D'autre part, et par voie de conséquence, de réduire la part du budget municipal consacré aux postes énergétiques (exemple type : éclairage public)

Le projet CES-Med permettra aux communes de :

-Concevoir, préparer et disposer de PAE (plans d'action énergétiques) sectoriels comme par exemple ,l'efficacité énergétique des bâtiments publics ou privés, l'éclairage public, précisant les investissements à entreprendre en vue d'atteindre des objectifs de réduction de consommation dans un calendrier connu et ce dans une logique de rentabilité financière (approche coût-bénéfice).

- Détenir de documents de référence établis suivant une méthodologie reconnue internationalement et permettant des échanges d'expériences avec les pays de la région et ceux de l'UE.

- Disposer dans chaque APC d'une équipe mobilisée et techniquement formée qui pourra constituer un réseau de compétences dans le domaine.

-Partager les expériences et les acquis algériens et participer activement au dialogue international soutenu par l'UE avec les pays du Sud et de l'Est de l'UE en matière d'énergies renouvelables et de réduction des émissions carbone au niveau des collectivités locales et des municipalités en disposant d'une plate-forme comme la « convention des maires » et pour le point focal de jouer un rôle actif dans le dialogue régional ENP Sud en particulier ;

- Permettre la réplique en Algérie auprès d'autres APC via l'APRUE et le Ministère de l'Intérieur et des Collectivités Locales.

CHAPITRE V : ANALYSE DU CONTEXTE CLIMATIQUE, ENERGETIQUE, ENVIRONMENTAL DE LA VILLE DE BEJAIA.

❖ Le projet Med-Eneec :

Le projet Med-Eneec (Efficacité énergétique dans le secteur du bâtiment en Méditerranée), financé par l'Union Européenne, a pour objectif principal l'introduction de mesures d'efficacité énergétique dans le secteur du bâtiment dans les pays méditerranéens. Dans ce cadre, un projet pilote de logement rural dans lequel sont intégrés divers moyens d'économiser l'énergie est conçu et réalisé au CNERIB (APRUE, 2008).

L'objectif principal du projet pilote est :

- l'introduction de la démarche de l'économie d'énergie dans l'acte de bâtir et ce aux niveaux conception et mise en œuvre. Ce projet se distingue des constructions classiques par l'utilisation des éléments suivants :
- Système constructif à base de maçonnerie porteuse chaînée,
- Matériau de construction localement disponible à savoir le BTS (Béton de Terre Stabilisée), le liant utilisé pour la stabilisation du bloc est le ciment avec une concentration pondérale maximale de 6%,
- L'énergie solaire pour la production d'eau chaude sanitaire et d'eau chaude pour le plancher chauffant,
- Le double vitrage dans les ouvrants pour réduire les apports et les déperditions calorifiques,
- La ventilation naturelle, - L'ombrage et l'éclairage naturels à travers une orientation optimale de l'ouvrage et enfin l'isolation optimale de l'enveloppe et la toiture.

Cette initiative vise à passer d'un logement «Energivore» à un logement de «Haute Qualité Environnementale» et de «Haute Efficacité Energétique» grâce à une éco-conception et à l'introduction des principes bioclimatiques, d'efficacité énergétique et d'intégration de l'énergie solaire (Chenak. 2009).

❖ Le projet Med-Eneec II :

Le projet Med-Eneec II encourage l'efficacité énergétique et l'utilisation de l'énergie solaire dans le secteur de la construction. Il joue un rôle essentiel dans la conception et la mise en œuvre de mesures de coopération entre l'Union européenne (UE) et ses partenaires méditerranéens, ainsi qu'entre les partenaires eux-mêmes. Med-Eneec II s'engage également à sensibiliser le grand public et à impliquer la société civile dans les techniques de

CHAPITRE V : ANALYSE DU CONTEXTE CLIMATIQUE, ENERGETIQUE, ENVIRONMENTAL DE LA VILLE DE BEJAIA.

construction qui prennent en compte les données climatiques, l'efficacité énergétique et l'utilisation des énergies renouvelables dans la construction de bâtiments.

L'objectif de ce projet :

Ce projet se concentre sur le renforcement des services aux entreprises et le soutien des marchés, l'amélioration des capacités institutionnelles, l'établissement de structures institutionnelles favorables ainsi que d'instruments fiscaux et économiques. Des projets pilotes de formation sont mis en œuvre afin de présenter les meilleures pratiques ; l'objectif étant de garantir le transfert des compétences et de garantir les capacités. Des actions d'accompagnement des projets de grands bâtiments sont aussi prévues dans le cadre de ce programme.

5.5 Présentation de Bejaia :

Bejaia est une ville méditerranéenne d'une latitude de 36.75 N et longitude 5.0667 E' située en Nord-est de la cote algérienne, à 230 Km de la capitale d'Alger (Figure 4.11). Elle s'étend sur une superficie de 3223,5 Km², elle comprend 52 Communes dans 19 Dairas.

La wilaya est limitée par :

- wilaya de Jijel à l'Est
- wilaya de Tizi ousou à l'Ouest
- wilaya de Bordj Bou Arreridj au Sud
- wilaya de Sétif au Sud-est
- wilaya de Bouira au Sud-ouest.



Figure 5.7 Situation géographique de la ville de Bejaia (source : Google earth).

CHAPITRE V : ANALYSE DU CONTEXTE CLIMATIQUE, ENERGETIQUE, ENVIRONNEMENTAL DE LA VILLE DE BEJAIA.

Bejaia appartient au domaine méditerranéen, et son climat varie de la zone littorale à la zone de montagnes puisque ; la première zone du littorale et la vallée de la Soummam jouissent d'un climat pluvieux et doux en hivers, sec et chaud en été, la deuxième zone de montagnes se caractérise par un été sec et chaud et un hiver pluvieux et froid.

5.5.1 Les caractéristiques climatiques :

Les données météorologiques de la ville de Bejaia pour la période 2009/2013 (voir l'annexe 2) nous ont permis l'analyse des facteurs du climat: la température de l'air, humidité relative, les précipitations, le vent, la durée d'ensoleillement.

a) Température de l'air :

Les données recueillies sont présentées à l'aide de graphiques de températures moyennes mensuelles (Figure 5.8). Ils illustrent une augmentation progressive des températures du mois de février au mois d'août, atteignant leur valeur maximale de 31,1 °C. Ensuite, une diminution progressive des températures est observée, atteignant la valeur minimale de 6,2 °C en février. La température moyenne annuelle est de 17,93 °C, avec des amplitudes mensuelles variant entre (8,9 - 9,8) °C, et une amplitude annuelle de 24,9 °C.

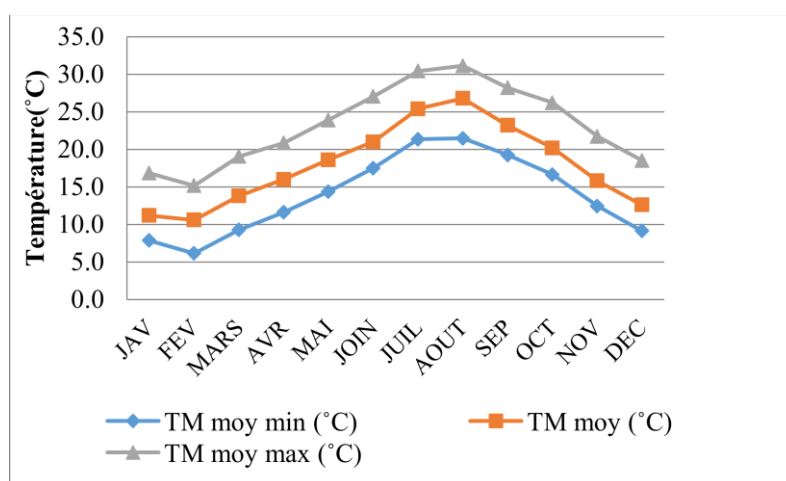


Figure 5. 8 . Evolution des températures de l'air à Bejaia (source : station météorologique, aéroport de Bejaia).

b) Humidité Relative :

Les données recueillies sont présentées à l'aide de graphiques d'humidité relative (Figure 5.9). Les valeurs moyennes de l'humidité fluctuent autour de 78,75 %, avec une valeur maximale de 86 % en novembre et une valeur minimale de 72 % pendant les mois de juillet et août.

CHAPITRE V : ANALYSE DU CONTEXTE CLIMATIQUE, ENERGETIQUE, ENVIRONNEMENTAL DE LA VILLE DE BEJAIA.

- Corrélation entre la température de l'air et l'humidité relative : Il existe une relation inversement proportionnelle entre la température de l'air et l'humidité relative (Figure 5.10).

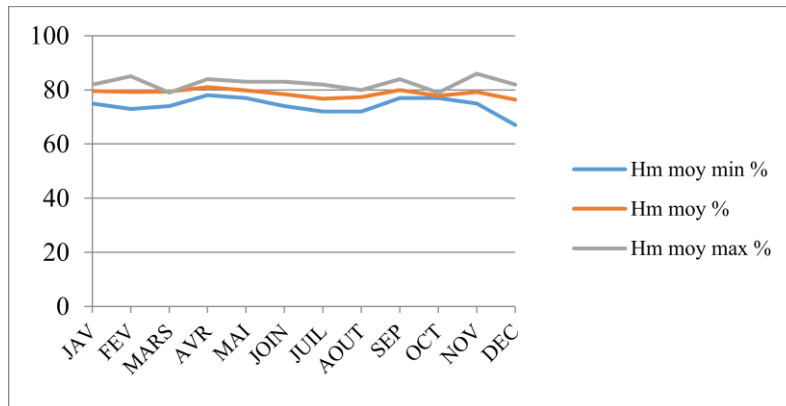


Figure 5.9. Les valeurs d'humidité relative à Bejaia (source : station métrologique, aéroport de Bejaia).

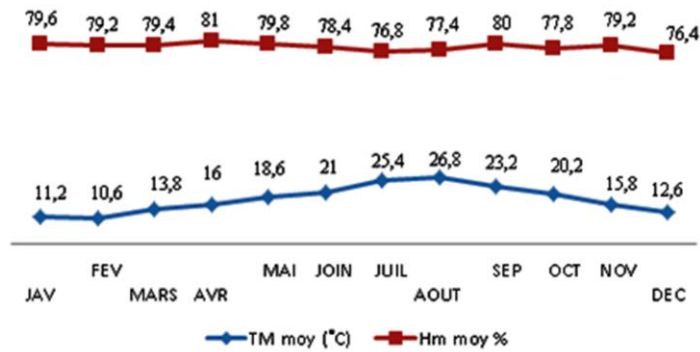


Figure 5.10 Les valeurs d'humidité relative et température de l'air à Bejaia (source : station métrologique, aéroport de Bejaia).

Précipitations :

La répartition annuelle des précipitations à Bejaia est marquée par une période pluvieuse s'étendant du mois de septembre au mois de mai. Une valeur maximale de 153,8 mm a été enregistrée en février (voir Figure 5.11), tandis qu'une valeur minimale de 3,4 mm a été enregistrée en juillet, avec un cumul annuel de 896 mm

CHAPITRE V : ANALYSE DU CONTEXTE CLIMATIQUE, ENERGETIQUE, ENVIRONMENTAL DE LA VILLE DE BEJAIA.

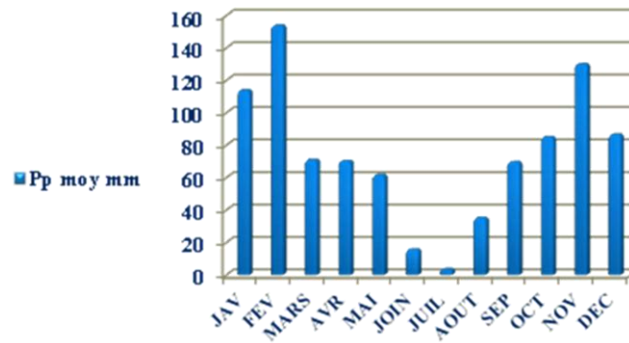


Figure 5.11 Pluviométrie à Bejaia (source : station métrologique, aéroport de Bejaia).

c) Vitesse des vents :

Les vitesses moyennes maximales sont enregistrées d'octobre à janvier, atteignant une valeur maximale de 3,9 m/s. En revanche, les valeurs minimales sont enregistrées de février à mai, à partir desquelles on observe une stagnation autour de la valeur de 3,1 m/s (voir Figure 5.12).

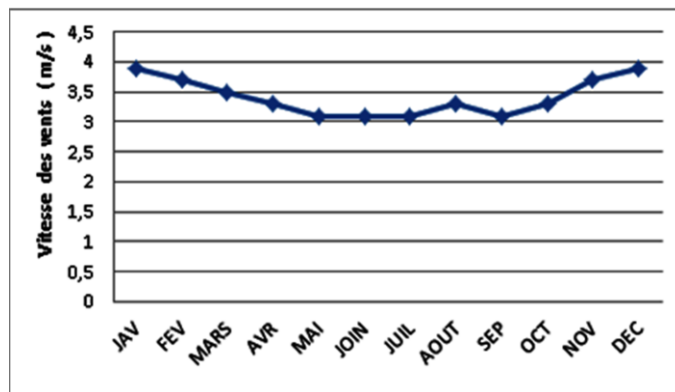


Figure 5.12 la vitesse des vents dominant à Bejaia (source : station métrologique, aéroport de Bejaia).

d) La Durée d'Ensoleillement :

À partir des données recueillies et des graphiques relatifs à la durée d'ensoleillement de la ville de Bejaia (Figure 5.13), on observe une augmentation progressive de la durée d'ensoleillement du mois de mars au mois d'août, atteignant une durée maximale de 319,6 heures. Ensuite, on constate une diminution progressive des valeurs pour atteindre 149,8 heures au mois de février.

CHAPITRE V : ANALYSE DU CONTEXTE CLIMATIQUE, ENERGETIQUE, ENVIRONMENTAL DE LA VILLE DE BEJAIA.

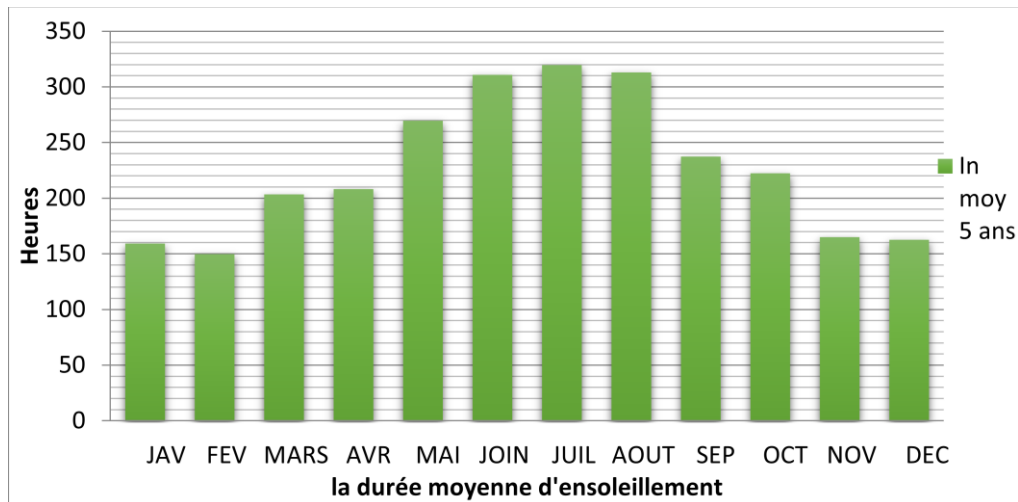


Figure 5.13. Durée d'ensoleillement à Bejaia (source : station métrologique, aéroport de Bejaia).

D'après cette analyse climatique, nous constatons que la région de Bejaia est caractérisée par un climat méditerranéen tempéré, avec un hiver pluvieux et doux, ainsi qu'un été chaud et sec avec un air chargé en humidité. Cette étude révèle deux périodes défavorables : les mois de juillet et août pour la saison estivale, et les mois de décembre et janvier pour la période hivernale.

5.6 L'analyse bioclimatique la ville de Bejaia :

Le climat et l'environnement ont un impact direct sur le confort humain (Olgyay et al. 2015), et les conditions atmosphériques peuvent influencer la productivité, la santé, ainsi que l'énergie mentale et physique de l'homme. Le bioclimatisme, concept intégrant le microclimat, l'architecture, et les conditions de confort thermique humain, est crucial dans ce contexte (Sayigh, 1998).

La conception bioclimatique en architecture, initiée par les frères Olgyay en 1953, vise à garantir l'existence et le bien-être des organismes biologiques, principalement l'homme, dans des conditions climatiques données (Olgyay, 1953). Elle repose particulièrement sur l'énergétique architecturale et rejette les environnements énergivores et inhumains.

Le bâtiment, en tant que lien ininterrompu entre l'environnement extérieur et l'espace intérieur habitable (Dutreix, 2010), remplit des fonctions cruciales telles que la protection contre les intempéries, la capture et le stockage de l'énergie solaire, la diffusion de la chaleur, et la régulation de l'ambiance. Atteindre le confort et l'efficacité énergétique nécessite des interventions sur le bâtiment et l'environnement, impliquant des mesures architecturales et techniques.

CHAPITRE V : ANALYSE DU CONTEXTE CLIMATIQUE, ENERGETIQUE, ENVIRONMENTAL DE LA VILLE DE BEJAIA.

Les stratégies d'efficacité énergétique basées sur l'architecture bioclimatique améliorent le confort thermique et les performances énergétiques du bâtiment, en utilisant notamment le diagramme bioclimatique de Givoni (Manzano, 2015).

5.6.1 Application de l'approche bioclimatique :

Les stratégies de conception bioclimatique dépendent d'une définition précise du climat de la région (Labaki, 1998), (Beccali, 2018). C'est pourquoi l'analyse bioclimatique de la ville de Bejaia, utilisant la méthode du diagramme bioclimatique de Givoni, repose en premier lieu sur les données climatiques de la ville.

Le diagramme bioclimatique permettra des recommandations conformes au climat de la région et un certain nombre de stratégies de conception, telles que l'orientation du bâtiment par rapport au soleil et au vent, le traitement et l'aménagement extérieur du sol, l'épaisseur des parois, le choix des matériaux de construction et de couleur, les conditions d'ombrage, la ventilation du grenier, l'emplacement et la taille des ouvertures, la présence d'une ventilation transversale, le refroidissement par évaporation et le chauffage solaire.

Il est important de rappeler que la région de Bejaia appartient au climat méditerranéen tempéré, avec des spécificités telles que des étés chauds et secs (notamment la non-pluviosité de l'été en raison de l'air chaud chargé d'humidité) et des hivers doux et humides, avec des précipitations principalement pendant cette saison. Cette ville se caractérise par un climat humide selon les deux indices d'aridité : l'indice d'aridité de Martonne et le quotient pluvio-thermique d'Emberger.

a) Le diagramme de GIVONI et MILNE :
Cette méthode vise à déterminer l'essentiel de la conception du bâtiment pour garantir le confort. Elle se base sur les données climatiques, en particulier lors des périodes de contraintes physiologiques les plus extrêmes : les problèmes de surchauffe en été, de sous-chauffage ou de froid excessif en hiver, et d'humidité pendant la saison des pluies (Givoni, 1978).

Le diagramme est subdivisé en 14 zones différentes, dont les zones 1 et 2 correspondent à la zone du confort idéal. Lorsque l'espace analysé se situe en dehors de la zone de confort, des stratégies architecturales ou techniques appropriées peuvent être mises en œuvre pour déplacer les conditions environnementales et remédier aux sollicitations du climat (Chatelet, 1998; Morillón-Gálvez, 2004; Manzano-Agugliaro, 2015).

Sur le diagramme de Givoni, le climat de chaque mois est représenté par un segment avec deux points : le point gauche du segment ($T^{\circ}\text{min}$, HRmax représente la moyenne des

CHAPITRE V : ANALYSE DU CONTEXTE CLIMATIQUE, ENERGETIQUE, ENVIRONMENTAL DE LA VILLE DE BEJAIA.

températures nocturnes) et le point de droite du segment ($T^{\circ}\text{max}$, HRmin) représente le jour.

- Interprétation du diagramme : En appliquant cette méthode aux conditions climatiques de la ville de Bejaia (voir la Fig. 5.15), il est possible de formuler des recommandations spécifiques pour différentes périodes de l'année.

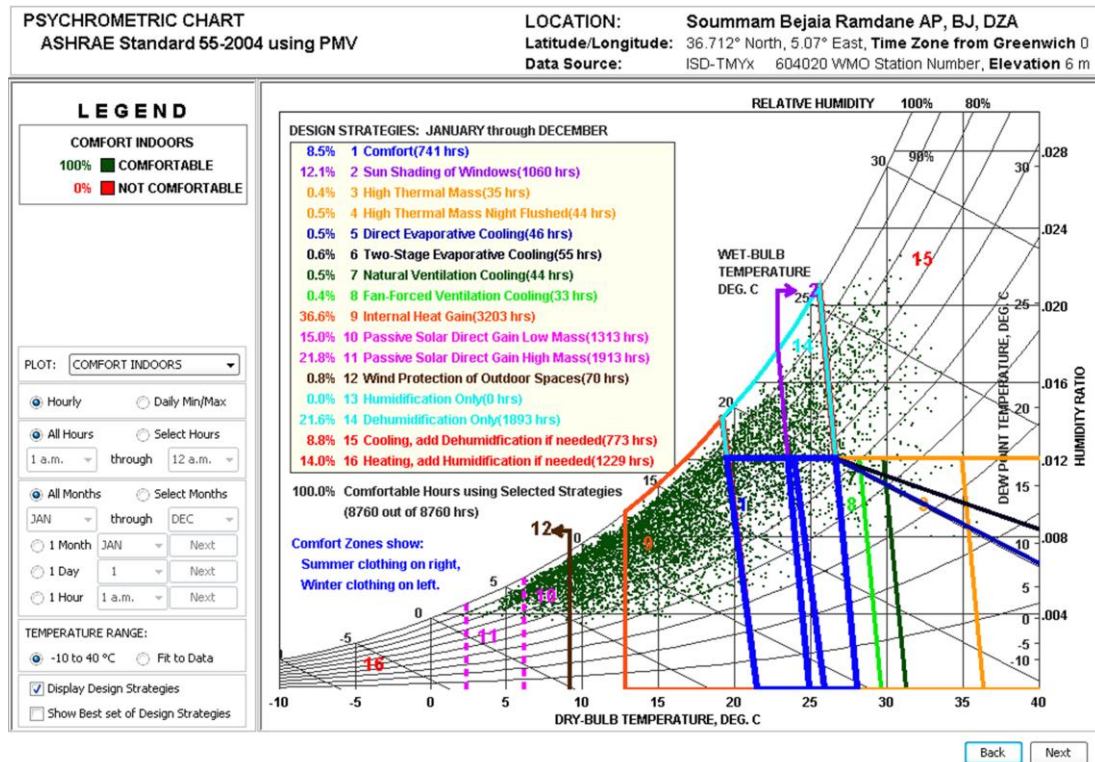


Figure 5.14 Diagramme psychrométrique appliqué sur la ville de Bejaia. (Source : l'auteur avec Climate consultant).

- Les journées des mois d'Avril, Mai et Novembre se situent dans la zone du confort admissible, laquelle est confortable pour 80% de la population (De Villermay, 1980), et aucune stratégie particulière ne doit être mise en œuvre.
- Les gains de chaleur internes, engendrés par les occupants de l'espace, ainsi que l'éclairage artificiel avec les appareils et les équipements produisant de l'énergie thermique, sont suffisants pour se rapprocher de la zone du confort durant les journées des mois de Décembre, Janvier, Février et Mars. Cependant, il est nécessaire de minimiser ces gains pendant les nuits des mois de Mai, Juin, Septembre et Octobre.
- Les techniques du chauffage passif sont recommandées pour se diriger vers la zone du confort durant les nuits des mois de Novembre, Décembre, Janvier, Mars et Avril. Il est essentiel de concevoir le bâtiment en favorisant le captage solaire, l'accumulation du

CHAPITRE V : ANALYSE DU CONTEXTE CLIMATIQUE, ENERGETIQUE, ENVIRONMENTAL DE LA VILLE DE BEJAIA.

rayonnement solaire et sa distribution à l'intérieur du bâtiment (captage de l'énergie solaire, stockage et restitution).

- L'installation de chauffage mécanique pendant la nuit est nécessaire au mois de Février. Ce système actif consomme une source d'énergie externe autre que l'énergie thermique solaire.
- Le confort pendant la nuit des mois de Juillet et Août, ainsi que pendant les jours des mois de Juin et Octobre, peut être atteint par des techniques de ventilation naturelle telles que l'exposition des façades aux vents dominants et aux brises de mer, l'effet de cheminée, la tour à vent et l'utilisation du patio, ou par des stratégies mécaniques comme l'utilisation de ventilateurs.
- La climatisation est recommandée pour réduire la température et l'humidité relative, et atteindre le confort pendant les jours des mois de Juillet, Août et Septembre. Cependant, il est nécessaire de garantir l'économie d'énergie en adoptant des comportements responsables vis-à-vis de l'utilisation de la climatisation, tels que ne pas régler le thermostat à une température inférieure à la normale et désactiver les appareils de climatisation en quittant la pièce.

b) Application de la méthode de Mahoney :

Il s'agit d'une méthode d'analyse des données climatiques basée sur les températures mensuelles, la température moyenne annuelle, les humidités relatives et la pluviométrie de la région. À travers les tables de Mahoney, il est possible de définir des recommandations nécessaires pour assurer le confort hygrothermique d'un bâtiment. Ces recommandations englobent des aspects généraux de la construction tels que l'orientation, la protection contre la pluie ou le soleil, jusqu'aux détails comme la dimension des ouvertures, l'isolation des murs et de la toiture.

Les tableaux de Mahoney ont mis en évidence des recommandations spécifiques et détaillées visant à garantir le confort hygrothermique d'un bâtiment (voir annexes B : tableaux de Mahoney).

Recommandations spécifiques :

- ❖ Disposition du plan de masse : Orientation Nord-sud (suivant un axe longitudinal est-ouest).

CHAPITRE V : ANALYSE DU CONTEXTE CLIMATIQUE, ENERGETIQUE, ENVIRONMENTAL DE LA VILLE DE BEJAIA.

- ❖ Espacement entre bâtiment : Grand espacement entre les bâtiments avec protection contre le vent.
- ❖ Assurer une circulation de l'air d'une façon permanente.
- ❖ Ouvertures moyennes 20%- 40%.
- ❖ Murs légers.
- ❖ Toiture légère et isolante.
- ❖ Protection nécessaire contre les pluies.

Recommandations sue le détail :

- ❖ Dimensions des ouvertures moyennes : 25 %- 40 %.
- ❖ La position des ouvertures favorable est au Nord et au sud avec des murs s'élevant face au vent.
- ❖ Protection des ouvertures contre la pluie.
- ❖ Les murs et les planchers doivent être Leger avec une capacité thermique faible.
- ❖ Toits : toiture légères quand c'est l'ensoleillement.
- ❖ Dispositions externes : Drainage adéquat des pluies.

Synthèse de l'analyse bioclimatique :

Cette dernière partie s'est concentrée sur l'analyse bioclimatique de la ville de Bejaia. Les deux méthodes utilisées ont permis de définir les particularités de cette région ainsi que les stratégies nécessaires pour atteindre un confort optimal tout au long de l'année. Le confort en climat de Bejaia dépend principalement des stratégies passives, englobant l'orientation, l'implantation, la conception architecturale, les murs, les ouvertures et la toiture. Les stratégies mécaniques ne sont nécessaires que dans quelques mois pour atteindre le confort.

Durant la période froide, le chauffage passif est recommandé pendant cinq mois de l'année, avec une orientation favorisant le captage solaire passif et des façades présentant des ouvertures de dimensions moyennes situées judicieusement au Nord et au Sud, protégées contre la pluie. Pendant certains jours de ces mois, les gains de chaleur internes sont suffisants pour se rapprocher de la zone du confort, sauf pour le mois le plus froid qui nécessite l'installation d'un chauffage d'appoint la nuit.

Pour assurer le confort pendant la saison chaude, il est essentiel de favoriser la circulation permanente de l'air au niveau du plan de masse, avec un grand espacement entre les bâtiments et en adoptant des protections contre le vent. À l'intérieur des bâtiments, les techniques de ventilation naturelle sont recommandées et peuvent être améliorées par des méthodes de ventilation mécanique. Pendant les périodes de chaleur

CHAPITRE V : ANALYSE DU CONTEXTE CLIMATIQUE, ENERGETIQUE, ENVIRONMENTAL DE LA VILLE DE BEJAIA.

intense, l'utilisation de la climatisation est nécessaire, tout en minimisant les gains de chaleur internes et les gains solaires grâce à l'utilisation de protections solaires.

5.6.2 Recommandation pour l'insertion du bâtiment en climat tempéré chaud méditerranéen :

Deux points majeurs doivent être pris en considération dans cette région chaude et humide (Olgyay, 2015) : éviter l'excès de rayonnement solaire et favoriser l'évaporation de l'humidité en utilisant les brises du vent. Cela peut être réalisé en construisant des bâtiments dispersés qui permettent la libre circulation de l'air et en érigeant des constructions au milieu de l'ombre de la flore environnante, utilisant ainsi la végétation comme protection solaire.

La proximité de la mer réduit les écarts journaliers et augmente l'humidité relative (Liébard, 2005). L'air chaud est chargé d'humidité, et il est essentiel d'accélérer les mouvements de l'air en été, tant au niveau de l'environnement extérieur qu'à l'intérieur des bâtiments, favorisant ainsi une ventilation naturelle efficace.

Sur la disposition du plan de masse, l'orientation Nord-Sud (suivant un axe longitudinal est-ouest) est favorable, avec un grand espacement entre les bâtiments pour assurer une circulation d'air permanente.

Cependant, il est important de prévoir des protections contre les vents froids et d'occulter les dispositifs de ventilation naturelle pour éviter toute déperdition de chaleur au niveau du bâtiment.

Implanter les bâtiments face aux brises de mer et parallèles aux vents froids peut améliorer le potentiel de la ventilation naturelle pendant l'été, tout en se protégeant des vents en hiver.

Plus précisément sur les côtes, comme dans la ville de Bejaia, orienter le bâtiment vers le Nord-Est peut encore améliorer le rafraîchissement grâce aux brises de mer fraîches. Dans ce cas, les protections solaires au niveau de la façade sont indispensables, telles que les pare-soleil verticaux, la végétation, et l'utilisation de pare-soleil horizontaux pour occulter les ouvertures de dimensions moyennes.

De plus, la conception architecturale et l'enveloppe du bâtiment doivent intégrer les techniques du chauffage solaire passif, en mettant l'accent sur l'orientation et l'organisation des espaces en plan et en coupe, ainsi que sur une isolation thermique soignée des murs et de la toiture.

CHAPITRE V : ANALYSE DU CONTEXTE CLIMATIQUE, ENERGETIQUE, ENVIRONMENTAL DE LA VILLE DE BEJAIA.

Il est essentiel d'adopter une inertie thermique permettant d'accumuler la chaleur solaire et de la redistribuer tout au long de la journée. Une protection adéquate contre les pluies, ainsi qu'un système de drainage approprié, doivent être envisagés pour se protéger en hiver.

Les espaces intermédiaires tels que les balcons, les vérandas, les loggias et les galeries sont couramment utilisés, surtout en raison de l'humidité élevée, car ils présentent plusieurs avantages (Liébard, 2005) : ce sont des endroits confortables, bien ventilés, offrant une protection contre les rayonnements solaires et la pluie.

la ventilation naturelle affecte le confort de l'homme, la température et le taux d'humidité de l'air dans les surfaces intérieur (Givoni, 1978). Afin d'améliorer la ventilation au sein du bâtiment, plusieurs aspects doivent être pris en considération (Watson, 1986) :

- Le terrain environnant : Connaître la forme du terrain et utiliser les arbres et les arbustes pour canaliser les flux d'air vers le bâtiment.
- Pour augmenter l'exposition aux courants d'air, il est recommandé d'orienter l'enveloppe du bâtiment perpendiculairement à la direction des vents dominants et de placer le bâtiment sur pilotis, tout en utilisant les avancées de toiture et les auvents sur la façade en surpression.
- Utiliser un plan ouvert avec un minimum d'obstacles et de cloisons, et prévoir des entrées et des sorties d'air dans chaque pièce afin de favoriser la circulation de l'air à l'intérieur.
 - Prévoir une circulation d'air verticale et favoriser l'effet de cheminée à l'intérieur.
 - Utiliser des murs à double paroi pour la ventilation de l'enveloppe.
 - Assurer un certain niveau de porosité de la paroi afin d'augmenter sa capacité à être traversée par les écoulements d'air.
- Prévoir des ouvertures pour extraire l'air vicié depuis certains espaces vers l'extérieur (notamment depuis la cuisine et la salle de bain).
- Orienter les portes et les fenêtres extérieures directement face au vent pour obtenir les conditions de ventilation optimales.

CHAPITRE V : ANALYSE DU CONTEXTE CLIMATIQUE, ENERGETIQUE, ENVIRONMENTAL DE LA VILLE DE BEJAIA.

Conclusion :

Le besoin croissant en logements a entraîné une construction accélérée de bâtiments, compromettant les normes qualitatives d'un habitat ainsi que sa performance énergétique et environnementale. En conséquence, le confort des occupants est souvent assuré par l'utilisation de systèmes actifs de chauffage et de refroidissement.

Malgré les programmes établis en vue de la maîtrise de l'énergie, des lacunes persistent au niveau législatif, et la réglementation thermique en vigueur ne fixe pas de seuils contraignants pour la consommation énergétique des bâtiments, contrairement aux exigences des labels observées dans de nombreux pays tels que BREEM, Minergie, Passive House et LEED.

Le climat représente l'un des principaux facteurs à prendre en compte pour maintenir des conditions confortables dans le bâtiment. L'identification des spécificités climatiques d'une région en climat tempéré chaud méditerranéen est indispensable avant de concevoir et de s'intégrer à cet environnement. À travers l'analyse des paramètres climatiques, la région de Bejaia se distingue par des hivers doux et pluvieux, ainsi que des étés chauds et secs avec un air chargé d'humidité, rendant les mois de juillet et août peu favorables pour la saison estivale, et les mois de décembre et janvier défavorables pour la période hivernale.

L'application de l'approche bioclimatique révèle que le confort en climat de Bejaia dépend principalement des stratégies passives liées au chauffage solaire passif, englobant l'orientation, l'implantation, la conception architecturale, les murs, les ouvertures et la toiture. Le confort thermique est accessible en été grâce à l'accélération de la vitesse de l'air et une ventilation naturelle efficace à l'intérieur du bâtiment, tandis que la climatisation est nécessaire dans certains mois.

Pour optimiser la ventilation naturelle, plusieurs aspects doivent être pris en compte, notamment l'aménagement de l'environnement, ainsi que des aspects liés à la conception des bâtiments tels que le plan intérieur, l'orientation, la position et la dimension des ouvertures.

CHAPITRE VI : EXPLORATION DES CAS D'ETUDE

Introduction

À travers le chapitre précédent, les spécificités climatiques de la région de Bejaia et les recommandations nécessaires pour construire dans le domaine du littoral algérien et en milieu tempéré méditerranéen ont été explorées et déterminées. Ainsi, l'objectif de ce chapitre est de mener une investigation dans deux cas d'étude situés dans la localité de la ville de Bejaia.

L'investigation se base sur le processus d'évaluation des bâtiments en cours d'utilisation, connu sous l'appellation "Environmental Post Occupancy Evaluation of building in use" (EPOE) (KORICHI, 2007). Les variables indépendantes de recherche sont le confort thermique et l'efficacité énergétique dans deux bâtiments à usage résidentiel collectif, ainsi que leurs implications sur la performance énergétique et environnementale.

À travers la revue de la littérature liée à cette thématique, il ressort que dans le cas de la majorité des habitations collectives, les normes et exigences de la performance énergétique du bâtiment n'ont pas été appliquées et intégrées, ce qui entraîne une consommation énergétique élevée par les foyers. L'objectif est de confirmer cette hypothèse dans le contexte d'étude à Bejaia à travers l'exploration menée sur le terrain dans deux cas de bâtiments différents.

6.1 Investigation du logement social collectif à Bejaia

Le logement collectif retenu pour cette étude présente des caractéristiques similaires à celles d'autres bâtiments résidentiels dans la région méditerranéenne algérienne, avec des variations typologiques comparables. Ces caractéristiques sont représentatives des modes de construction existants, des matériaux de construction, et d'autres aspects liés au bâtiment tels que l'architecture, l'enveloppe, le site et l'environnement (implantation, orientation, etc.), ainsi que l'utilisation du bâtiment (occupation, ventilation, climatisation).

L'étude du premier cas, le "bâtiment conventionnel", permettra de présenter le comportement thermique et la performance énergétique du bâtiment résidentiel conventionnel. Elle vise également à déterminer les dispositions qui contribuent au confort en hiver et en été, le cas échéant. L'objectif ultime est de transformer ce bâtiment en un bâtiment à haute performance énergétique conforme aux normes internationales du confort ou du Passivhaus.

6.1.1 Description Du Cas d'étude :

a- Présentation du bâtiment :

Ce cas d'étude s'intéresse à un immeuble de logement collectif existant (habitat social), il a été construit en 2007 dans le cadre du programme 140 logements sociaux locatifs « 36/140 Logts LSL 2007 » à SIDI ALI LEBHAR dans la commune chef lieux de Bejaia (Fig. 6.1), ce bâtiment a été habité à partir de 2015.

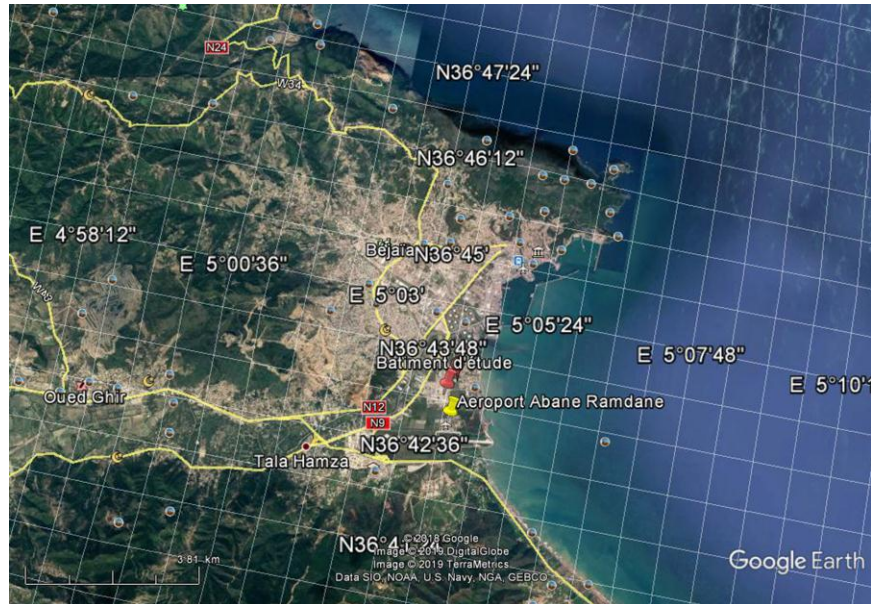


Figure 6. 1 Situation du bâtiment d'étude. (Source : Google Earth)



Figure 6. 2 Le premier bâtiment d'étude. (Photographie prise le 25 décembre 2018, source : l'auteur).

Cette résidence de 36 logements comprend deux bâtiments ayant une forme en « L » organisée en symétrie (Fig. 6.2). Cette typologie offre deux façades principales et une façade arrière, comme illustré sur la figure 4.3 du plan de masse. L'immeuble étudié est

CHAPITRE VI : EXPLORATION DES CAS D'ETUDE

constitué de 18 logements de type F3 et F2 répartis sur R⁺⁶. Chaque niveau a une surface de 285 m² et contient trois logements par palier.

Concernant l'orientation du bâtiment d'étude, elle varie d'un logement à un autre. L'une des façades principales est orientée Nord-ouest, la seconde façade est orientée vers le sud, tandis que la façade arrière est orientée vers l'est (figure 6.3).

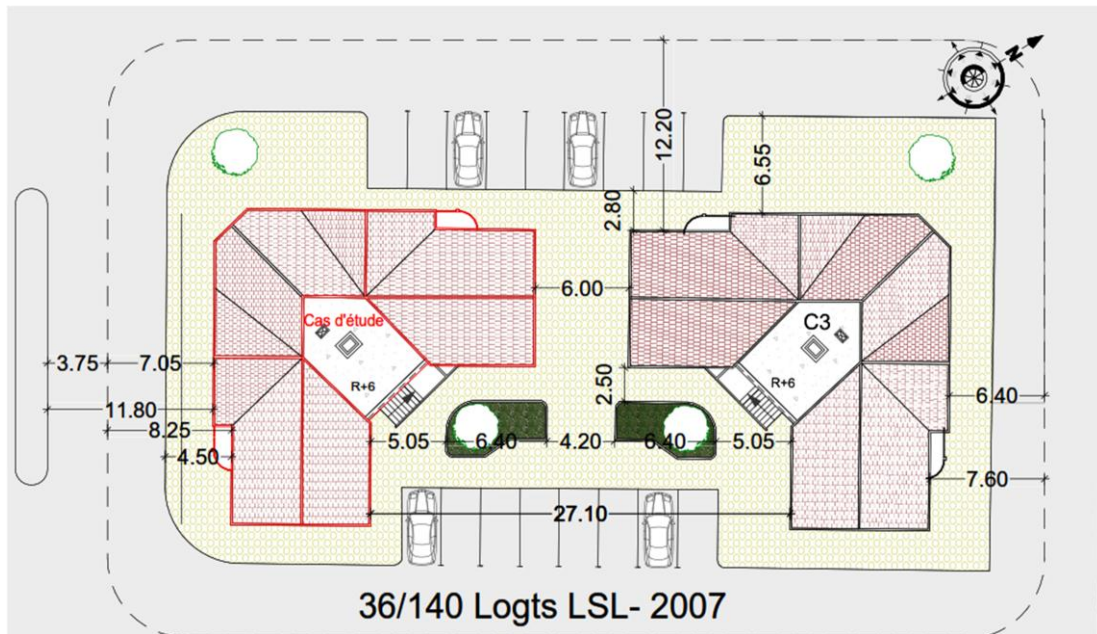


Figure 6. 3 Plan de masse du logement social collectif. (Source, l'auteur).

L'objet de cette étude est un logement de type F3 d'une surface de 89.75 m² (Kadi, 2023). Il est situé au premier étage et abrite une famille de sept personnes de différentes tranches d'âges (Fig. 6.4).

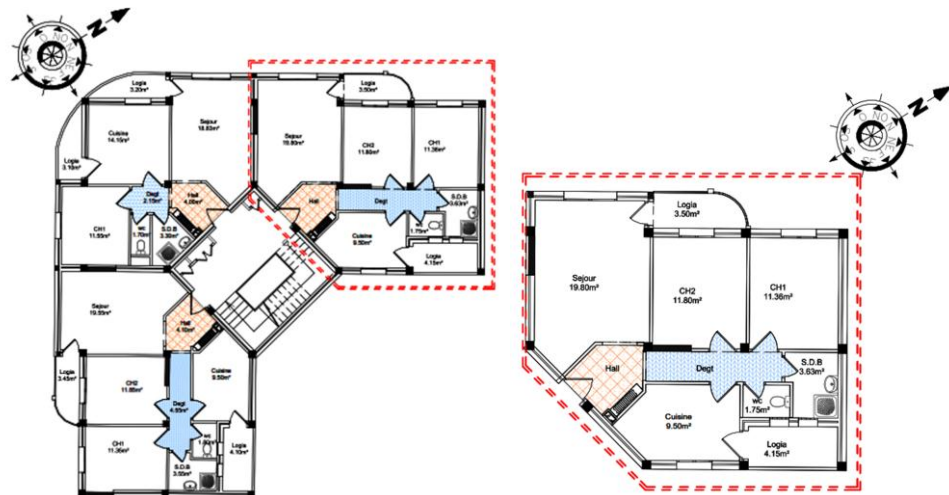


Figure 6. 4 Vue en plan sur l'étage courant du bâtiment (l'auteur, à partir des documents graphiques d'OPGI Bejaia).

Cet appartement est composé d'un séjour ouvert sur le hall d'entrée. Les autres espaces, tels que deux chambres, la cuisine, la salle de bains et les toilettes, sont agencés autour d'un dégagement.

Le bâtiment présente une structure en poteaux-poutres en béton armé avec un remplissage de briques creuses en terre cuite. Les fondations sont en béton armé, et le plancher intermédiaire est constitué de corps creux, comprenant une dalle pleine de 4 cm, des poutrelles et des hourdis. En dessous de cet étage, les garages non chauffés occupent le rez-de-chaussée.

b- Caractéristiques de l'enveloppe :

Afin de définir la composition de l'enveloppe du bâtiment, elle est décomposée en parois opaques et parois vitrées.

c- Les parois opaques : Les caractéristiques thermo-physiques des parois sont représentées sur le tableau 6.1.

Éléments	Matériaux Ext → int	Épaisseur (m)	Densité (kg/m ³)	Conductivité thermique λ (W/m °K)
Mur extérieur	Mortier de ciment	0.02	2200	1.4
	Brique creuse	0.15	900	0.48
	lame d'air	0.05	1.22	0.024
	Brique creuse	0.10	900	0.48
	Enduit en plâtre	0.02	750	0.35
Mur intérieur	Enduit en plâtre	0.02	750	0.35
	Brique creuse	0.10	900	0.48
	Enduit en plâtre	0.02	750	0.35
Plancher intermédiaire	Carrelage	0.02	1900	1
	mortier bâtard	0.02	1900	1.15
	béton hourdis	0.2	1080	1.45
	Enduit en plâtre	0.02	750	0.35

Table 6. 1. Caractéristiques thermo-physiques des parois opaques (Derradji, 2017 ; Imessad, 2014)

d-Les parois vitrées :

Les surfaces vitrées représentent environ 13% de la surface totale des parois verticales du logement et 15% de la surface du plancher. Les fenêtres de type 1 sont utilisées pour les espaces humides (salle de bains et WC) ; elles sont à simple vitrage avec une menuiserie en PVC. Les fenêtres de type 2 présentent les mêmes caractéristiques, mais elles sont équipées de protections solaires extérieures sous la forme de volets roulants en PVC. Les portes donnant sur les loggias sont en bois et comprennent une proportion de vitrage de 60%. Le tableau 6.2 présente leur composition et leurs caractéristiques. (Le coefficient K de transmission surfacique pour les parois vitrées est calculé par la formule donnée par le DTR C3.2 (voir Annexes C : données du DTR).

Table 6. 2 Composition de parois vitrées :

Désignation de l'ouverture	Matériaux	Conductance K (w/m ² K)
Fenêtre type 1	PVC	1.526
Fenêtre type 2	PVC	2.439
Porte sur loggia	Bois + vitrage	4.5
porte d'entrée	Bois	2

e-Protection solaire :

La gestion des protections solaires dépend de l'occupation du bâtiment, deux cas sont considérés :

-Durant l'hiver, les occultations solaires (volet roulant) sont mises en place à 50% durant la période d'occupation du bâtiment de 08 h jusqu'à 20 h, ces protections sont totalement fermés en période d'inoccupation.

-Durant l'été, pour la façade ouest les occultations solaires sont totalement fermées le jour de 13 h à 20 h puis sont mises en place le reste du temps de la période d'occupation et en période d'inoccupation les occultations solaires sont totalement fermés.

f-Perméabilité à l'air :

La perméabilité de l'enveloppe est déterminée par le calcul des déperditions par renouvellement d'air à travers les parois vitrées et les ponts thermiques. Pour la réglementation thermique Algérienne, les déperditions par renouvellement d'air d'un logement tient compte du : débit spécifique de ventilation (le système de ventilation courant dont l'extraction de l'air vicié s'effectue dans les pièces de service S.D.B, WC, cuisine) avec les déperditions supplémentaires par infiltration dues au vent (voir ANNEXES C).

-Période de chauffage (hiver) :

Pour le cas étudié (un logement de trois pièces principales), le débit d'air extrait réglementaire correspond à 105 m³/h pour la cuisine, 30 m³/h pour la salle de bain et 15 m³/h pour le WC. Pour permettre la ventilation de toutes les pièces depuis l'extérieur, le débit extrait de référence pour ce logement est égal à 87.5 m³/h (cette valeur a été calculée en utilisant la méthode de la réglementation thermique d'hiver, voir Annexe C).

-Période de rafraîchissement (été) :

Le seul moyen utilisé pour maintenir le confort en été est la ventilation naturelle, qui correspond à l'ouverture des fenêtres. Une sur ventilation naturelle durant la nuit est assurée par les ouvertures de toutes les pièces en période d'occupation. En revanche, aucun autre système actif (comme la climatisation) n'a été mis en place durant la saison estivale.

g-Les scénarios d'occupation :

Chaque occupant représente une source de chaleur sensible et latente d'une puissance totale supposée de 147 W par personne. Les scénarios d'occupation ont été définis en considérant une référence de sept occupants par logement, caractérisés par un travail très léger. Deux scénarios d'occupation sont déterminés en fonction de l'utilisation de tous les espaces du logement :

- **Un scénario « nocturne »** : présence à 80 % de 20 h à 22 h, à 100 % de 22 h à 08 h.

- **Un scénario « diurne »** : présence à 57 % de 8 h à 10 h, à 29 % de 10 h à 12 h, présence à 70 % de 12 h à 13 h, présence à 29 % de 13 h à 17 h, présence à 70 % de 17 h à 20 h. Le profil d'occupation du logement a été présenté sur la figure 6.5.

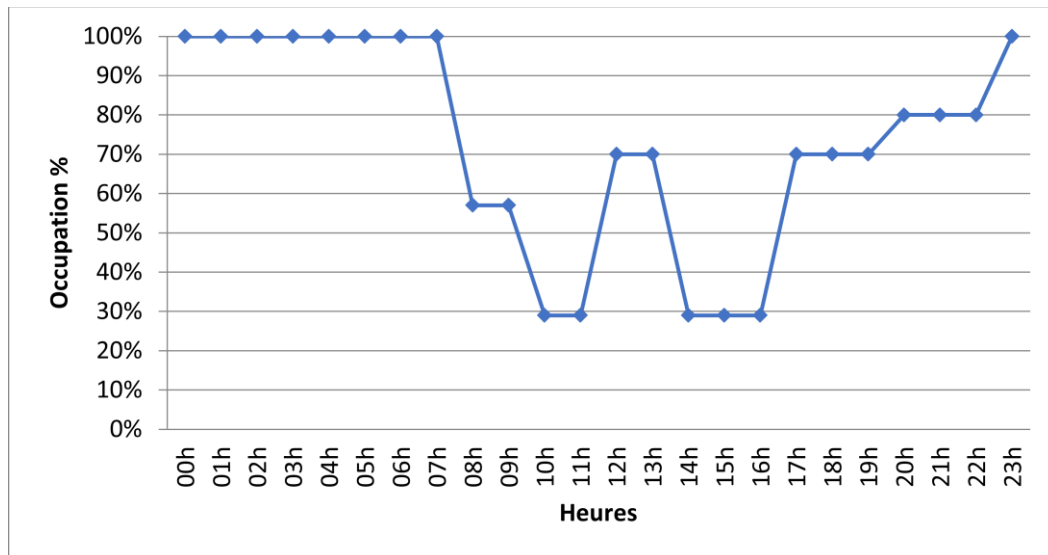


Figure 6. 5 Scénario d'occupation du logement. (Source : L'auteur)

h-Caractéristiques des usages :

Les usages regroupent les systèmes consommateur d'énergie intérieur (éclairage, appareils électriques, et électroménager avec les appareils à gaz), ces systèmes et les occupants dégagent une quantité de chaleur à l'intérieur de l'habitation il s'agit des gains internes. Ils peuvent diminuer la demande en chauffage et augmenter la demande en climatisation.

La puissance dissipée par l'ensemble de ces équipements selon leur utilisation donne une énergie dissipée d'environ 23710 kWh par an et l'énergie annuellement fournie par les occupants selon le scénario d'occupation peut atteindre 1170 kWh par an (il est exclu du calcul la puissance dissipé par les systèmes du chauffage et du refroidissement).

i-Le système du chauffage :

Le système de chauffage est alimenté au gaz naturel, et l'énergie calorifique est produite par la combustion du gaz naturel. Le dispositif est installé dans le hall près de l'entrée du logement. L'utilisation du chauffage n'est pas constante ; il est activé lorsqu'il y a une présence de 57 % de résidents, principalement entre 07 h et 11 h le matin, ainsi que le soir entre 18 h et 22 h. Sa puissance moyenne est de 10 kW.

6.1.2 Vérification de la conformité du bâtiment vis-à-vis la Réglementation thermique Algérienne :

Afin d'effectuer les calculs thermiques nécessaires pour vérifier la conformité du logement d'étude vis-à-vis de la réglementation thermique algérienne (DTR C3.2/4), le logiciel RETA a été utilisé (Fig. 6.6). Il s'agit d'une application développée par le Centre de Développement des Énergies Renouvelables (Imessad, 2017).

Le logiciel RETA est l'une des premières applications basées sur la réglementation thermique algérienne, accessible via le serveur web du CDER (Imessad, 2017). Il se présente sous forme d'une interface graphique permettant de décrire les différents composants d'un bâtiment, afin d'effectuer le calcul thermique et de dimensionner le système de chauffage et de climatisation conformément aux exigences de confort thermique intérieur.

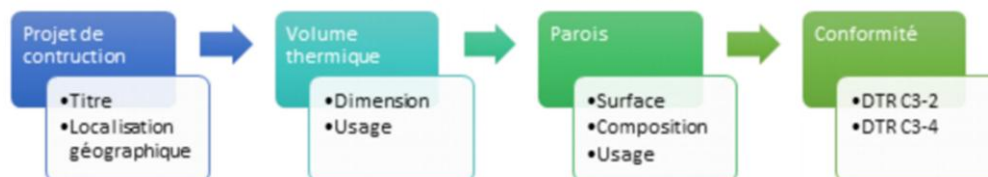
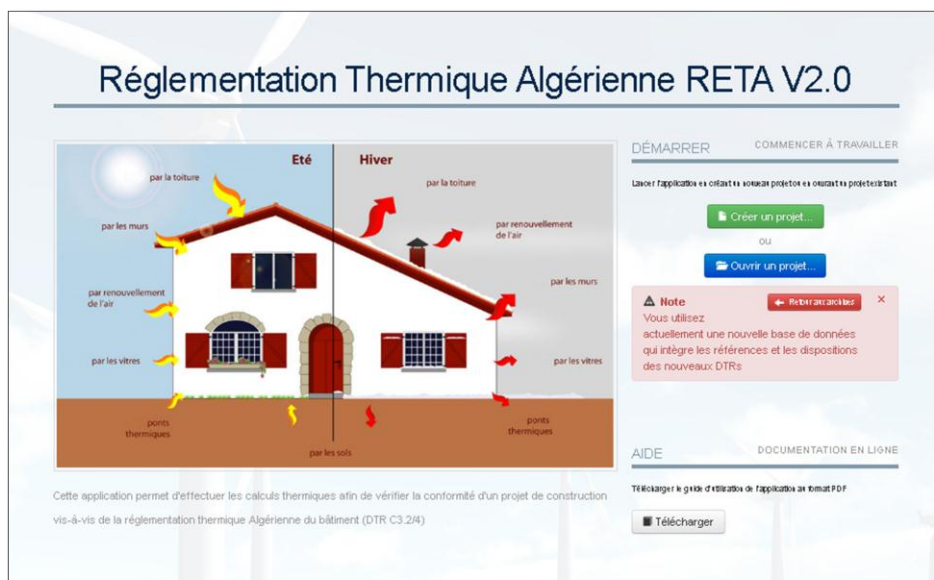


Figure 6. 6 Page d'accueil de RETA (Source : <http://reta.cder.dz/interact/#/>).

Ce logiciel est structuré en deux étapes principales : l'introduction des données relatives au projet (localisation géographique), les données relatives à l'enveloppe du bâtiment (volume, usage du bâtiment, conditions de confort interne), et la définition des parois opaques et vitrées (surface nette, orientation, composition). Après l'introduction de ces

CHAPITRE VI : EXPLORATION DES CAS D'ETUDE

données, l'application permet, en second lieu, de calculer et de récupérer les résultats de la vérification réglementaire en affichant un rapport détaillé et une synthèse des différentes valeurs.

a) Création et introduction des données du projet :

Après la création d'un nouveau projet sous le nom « Étude du logement », les données de localisation et géographiques de la ville de Bejaia et les conditions externes ont été introduits, par la suite les données concernant l'enveloppe (sa composition en parois opaques, fenêtres et portes et leurs caractéristiques) sont définis (voir la figure 6.7).

The screenshot shows a software interface for project management and energy calculations. The main window is titled "Projet ' Etude du logement ' / ' Etude du logement '". On the left, there is a list of defined walls, including "paroi salon/NO", "Fenetre1 salon/NO", "porte N", "Fenetre2 NO", "Fen3 NO", "FCuisin/E", "F_SDB/E", "F_WC/E", "paroi cage d'escalier", "paroi logia salon", "paroi2/NO", "paroi laterale N", "paroi cuisine E", "paroi logia cuisine", "paroi salon adjacent", "porte NE", "porte d'entrée", and "Plancher". The "plancher2" wall is selected. The right panel shows the details for "plancher2", including its composition, local adjacent, and various characteristics and calculations.

Caractéristiques générales de la paroi			
Description	Surface	Epaisseur	Résistance
Plancher / Opaque / Local non chauffé et non climatisé / Orientation : Horizontal (0°) La paroi est à l'ombre	89,7500 m ²	0,2600 m	0,2325 (m ² .°C)/W

Calculs Hiver (DTR C-3.2)					
Rés. sup.	K	Coef. C	Coef. Tau	DT	DTéf
0,3400 (m ² .°C)/W	1,7468 W/m ² .°C	2,0000 W/m ² .°C	0,9000	169,3203 W/°C	179,5000 W/°C

Calculs Eté (DTR C-3.4)				
Rés. sup.	K	Coef. C	ΔTSréf	Coef. Cine
0,1700 (m ² .°C)/W	2,4847 W/m ² .°C	2,7000 W/m ² .°C	4,0000 °C	1,0000

APD	APOréf
1 338,0039 W	989,3000 W

Figure 6. 7 Ecran du projet crée avec ces caractéristiques (Source : l'auteur).

Les paramètres et données relatifs au volume ou à l'enveloppe sont définis dans la case « Renouvellement d'air » pour calculer les échanges dus au renouvellement et la circulation d'air relatif au volume. Les paramètres C_{in} (Coefficient de surpuissance) et C_r (Coefficient des pertes Calorifiques dues au réseau de tuyauterie éventuel) sont définis pour calculer la puissance nécessaire pour chauffer l'enveloppe.

b) Conformité DTR :

Ce logiciel a permet de calculer les déperditions par transmission du logement D_T et les déperditions de référence D_{ref} et de vérifier la réglementation d'hiver si : $D_T \leq 1.05 * D_{ref}$. Il a permet d'un autre côté de calculer les apports de références A_{ref} et la somme des

CHAPITRE VI : EXPLORATION DES CAS D'ETUDE

apports calorifiques par les parois opaques aériennes APO et les apports calorifiques par les parois vitrés AV et de vérifier la réglementation d'été : $APO (15h) + AV (15h) \leq 1.05 * A_{ref}$. Le rapport complet obtenu d'après ce travail résulte : une conformité suite à la vérification C3.2 et non-conformité suite à la vérification C3.4 (Fig. 6.8).

Enveloppe	D = ΣDT	$\Sigma Dréf$	Vérification C-3.2	A = $\Sigma APO + \Sigma AV$	Aréf = $\Sigma APDréf + \Sigma AVréf$	Vérification C-3.4
Etude du logement	453,71	508,00	0,89 ✔ Conforme	4 810,91	2 820,04	1,71 ✘ Non conforme

Figure 6. 8 Vérification réglementaire par RETA (Source : l'auteur).

c) Synthèse des échanges thermiques en hiver :

La valeur des déperditions par transmissions du bâtiment est de 453,71 W/°C, elles sont inférieures aux déperditions de référence 508,00 W/°C. De ce fait l'exigence de la réglementation thermique d'hiver du DTR .C 3-2 est assurée (voir sur le tableau 6.3).

Table 6. 3 Vérification réglementaire d'été DTR. C-3.4.

DT	Dréf	Vérification C-3.2
453,71 W/°C	508,00 W/°C	0,89 ✔ Conforme

Ce résultat indique que : les déperditions par transmission de ce logement sont limitées et inférieures aux déperditions de référence du DTR C3.2, afin d'assurer une température intérieure confortable de 21 °C ; une puissance de chauffage de 8.9 kW est nécessaire avec 13 767,44 kWh/an du besoin annuel de chauffage (cette valeur est calculé en considérant deux paramètres Cin (Coefficient de surpuissance) et Cr (Coefficient des pertes Calorifiques dues au réseau de tuyauterie éventuel).

Remarque : Cette vérification thermique réglementaire ne tient pas compte des déperditions par renouvellement d'air (DTR .C 3-2).

d) Synthèse des échanges thermiques en été :

La valeur des apports calorifiques par les parois opaques est 4662,50 W, elle est supérieure presque deux fois plus que la valeur de référence des apports par les parois opaques et

CHAPITRE VI : EXPLORATION DES CAS D'ETUDE

l'équation de vérification de la réglementation d'été n'est pas assuré. Tandis que la valeur des apports calorifiques par les parois vitrées est inférieure aux valeurs de référence des apports par les parois vitrées.

La composition des parois opaques (mur extérieur) sans isolation entraîne l'augmentation des apports calorifiques transmis par les parois opaques. De ce fait, pour assurer une température intérieure de 27 °C pour le type du confort dit normal, une climatisation d'une puissance 11 kW est nécessaire dans une durée de 12 h.

Table 6. 4 Vérification règlementaire d'été DTR. C-3.4.

APO non Aériennes	APO Aériennes	APOréf	AV	AVréf	Vérification C-3.4	
0,00 W	4 662,50 W	2 468,05 W	148,41 W	352,00 W	1,71	Non conforme

Pour la vérification réglementaire d'été, le résultat obtenu par ce logiciel indique que le logement étudié n'est pas conforme à l'exigence de la réglementation d'été DTR C3.4

Remarque :

Cette vérification thermique règlementaire d'été ne considère plus les apports dus aux appareils électriques et électroménagers et les gains dus aux occupants et leur comportement, ainsi les scénarios d'usages du bâtiment.

Cette réglementation ne limite pas la consommation du chauffage et climatisation nécessaire pour assurer le confort thermique d'hiver et d'été.

6.1.3 Enquête au porte à porte :

D'après plusieurs travaux de recherche réalisés sur le confort thermique, deux approches d'évaluation du confort thermique se distinguent : l'approche analytique et l'approche adaptative. La première approche analytique se base sur le calcul du bilan thermique du corps humain pour prédire le niveau de confort thermique à travers deux indices (le vote moyen prévisible PMV et le pourcentage prévisible d'insatisfaits PPD), ils sont déterminés par les expérimentations en chambres climatique (P. O Fanger, 1984; Poul O Fanger 1970).

La deuxième méthode traite le confort thermique à travers les réactions comportementales, elle prend en compte les facteurs physiques, physiologiques et psychologiques, ces facteurs

CHAPITRE VI : EXPLORATION DES CAS D'ETUDE

ont été établies d'après des enquêtes et des études menées sur le terrain (Michael et al 2002).

Suite à l'approche adaptative, l'enquête sur le confort thermique a été multipliée sous différents climat et différents type de bâtiments. Les méthodes d'enquêtes varient selon l'objectif de l'étude (Moujalled, 2007), quelques enquêtes visent à déterminer les conditions du confort dans un climat et un type de bâtiment définie (Cécile, 2016), d'autres évaluent l'influence de certains indices et normes ou bien l'influence d'une stratégie particulière sur le confort thermique (Bouden, 2005; R. De Dear, 1998a; J. F. Nicol 2001).

L'objectif de l'enquête pour cette étude est d'étudier, d'une part, le comportement et le confort ressenti des occupants en hiver et en été en fonction des caractéristiques du bâtiment et des stratégies de chauffage et de rafraîchissement mises en place pour atteindre le confort, et d'autre part, d'explorer la consommation énergétique du bâtiment.

a) Le questionnaire :

L'enquête auprès du bâtiment collectif (le cas de notre étude) a été menée durant le mois de Janvier 2019. Elle se base sur un questionnaire d'une durée de quinze minutes. Le questionnaire se compose de 58 questions organisées en trois parties (voir ANNEXES E).

La première partie nommée « Information sur l'habitation » est composée de 10 questions permettant des information sur les caractéristiques principales des habitants, leur logement et son occupation.

La deuxième partie intitulée « Ambiance thermique, sensation de chaleur et du froid » s'organise en 40 questions, les cinq premières questions permettent d'explorer le confort thermique et le climat intérieur du logement par rapport à l'humidité et la qualité de l'air.

En plus de deux sous-parties : « Durant l'Hiver : à l'intérieur de votre logement » composée de 16 questions et « Durant l'été : à l'intérieur de votre logement » composée de 19 questions.

Cette deuxième partie constitue le cœur de notre enquête, elle permet de connaître les caractéristiques thermiques et l'air ambiant du logement et le comportement des occupants ainsi leur consommation énergétique pour chauffer et rafraîchir l'appartement.

La troisième et dernière question appelée « Vous et le bâtiment à haute performance énergétique : améliorations souhaitées » aborde des questions relative à la performance énergétique des bâtiments en générale et leur appartement en particulier et les

CHAPITRE VI : EXPLORATION DES CAS D'ETUDE

améliorations possibles, une marge est ouverte pour les commentaires des habitants qui leur permet d'exprimer librement sur d'autres problèmes et caractéristiques thermiques qui n'auraient pas été abordés lors de questionnaire.

b) Analyse des résultats d'enquête :

c) Participation :

Par le biais du questionnaire réalisé, l'enquête a été menée par interview directe (porte à porte) sur tous les logements du bâtiment d'étude, cela nous a permis d'augmenter le taux de participation et de réponses en reformulant avec plus de détails sur les questions. Sur 18 logements qui composent le bâtiment, le taux de participation est de 72% en moyenne (voir fig. 6.9), les autres logements du type F2 ont été inoccupés depuis les trois ans.

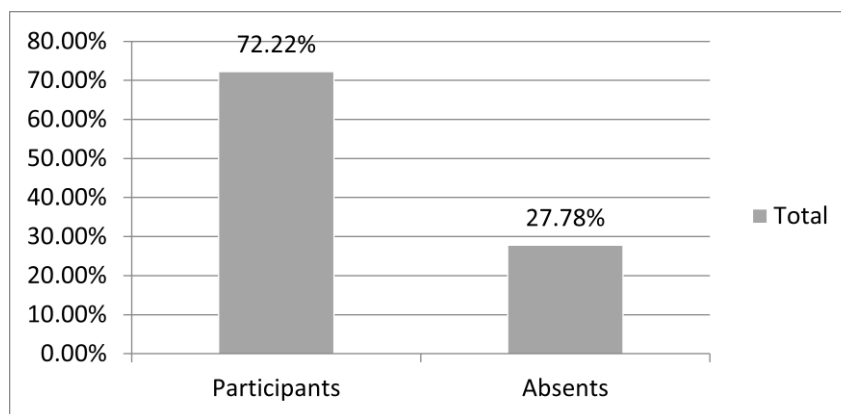


Figure 6. 9 Nombre de participant en pourcentage pour les logements du bâtiment d'étude (Source : l'auteur).

d) Par rapport à la typologie du logement :

L'immeuble résidentiel étudié est conçu selon un plan courant repartie sur six étages, chaque étage contient deux logements du type F3 et un seul du type F2. Sur l'ensemble des participants, la majorité de personnes interrogées occupent des logements du type F3 (voir la fig. 6.10).

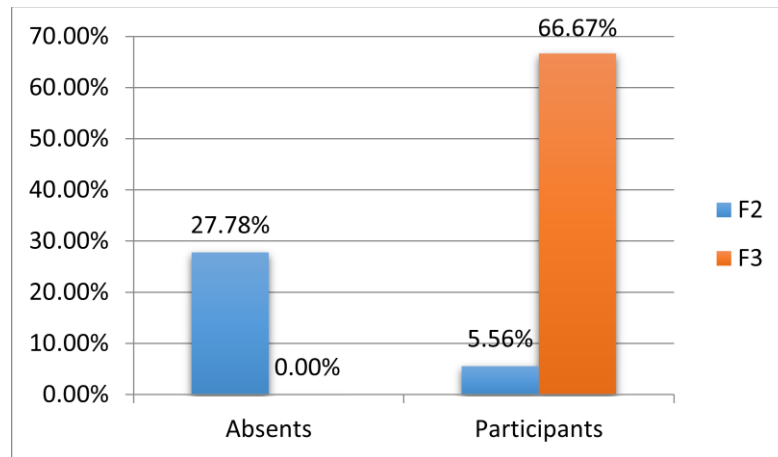


Figure 6. 10 Répartition en pourcentage du type d'appartement des participants. (Source : l'auteur)

e) Par rapport à l'orientation des logements :

Le taux de réponse pour les locataires des appartements orientés Nord-Ouest est identique à celui des appartements orienté Sud, au contraire, dans les appartements orientés Ouest nous n'avons obtenus un taux très faible de réponse (voir fig. 6.11). Pour cela, ces appartements et cette orientation ne peut être prise comme un objet d'investigation pour la suite de cette étude.

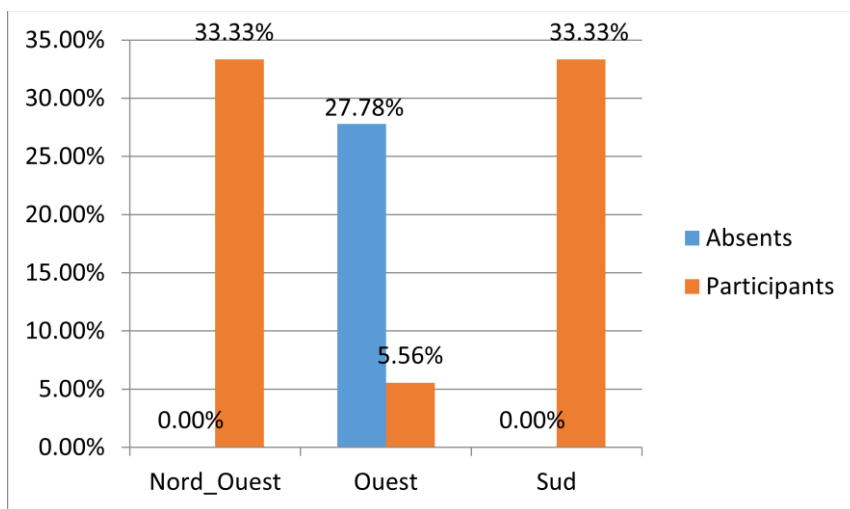


Figure 6. 11 Répartition en pourcentage de l'orientation des appartements de participants. (Source : l'auteur).

CHAPITRE VI : EXPLORATION DES CAS D'ETUDE

f) Confort thermique, comportement et consommation énergétique :

Des questions sur l'ambiance thermique et le climat intérieur dans les différents appartements ont été posées, et les résultats concernant la question "Trouvez-vous l'ambiance thermique de votre logement confortable ?" sont représentés sur la figure 6.12.

Environ 66 % des habitants du F3 orientés vers le sud trouvent leur logement confortable en toutes saisons, bien qu'il fasse froid en hiver. Cette réponse est également donnée par 50 % des habitants du F3 orientés Nord/Ouest.

Cependant, le reste des habitants du F3 orientés vers le sud considère leurs appartements comme confortables. Les mêmes résultats en termes de confort sont observés pour 33 % des habitants du F3 orientés Nord/Ouest, tandis que 16 % trouvent leurs logements inconfortables, pour les logements F3 et F2 ayant des orientations Nord/Ouest et Ouest, respectivement, par ordre de mention.

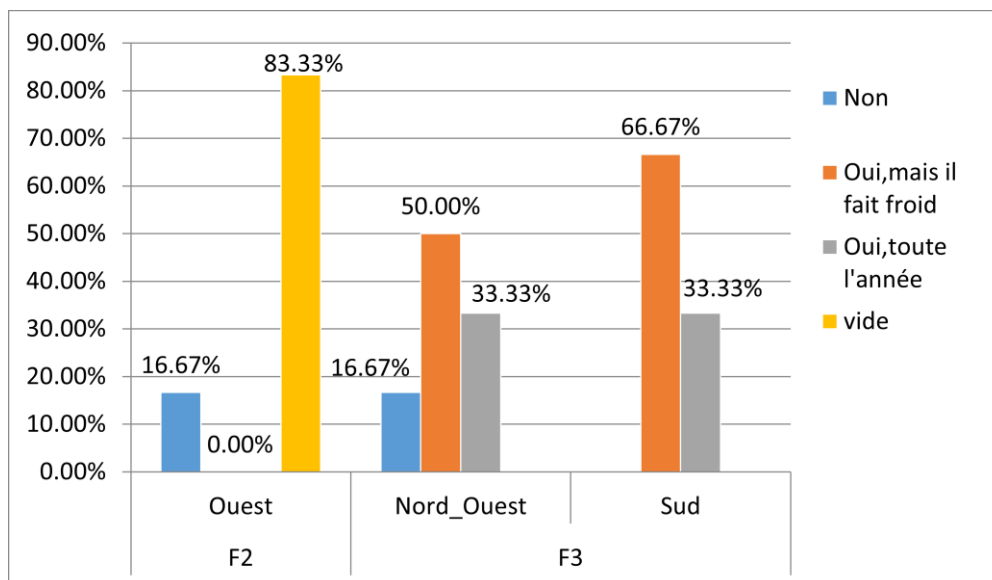


Figure 6.12 Répartition du Confort/Inconfort en fonction des logements et leurs l'orientation. (Source : l'auteur).

Concernant le climat intérieur, notamment les paramètres d'humidité et la qualité de l'air des logements (fig. 6.13), pour la majorité des habitants, soit environ 66 %, l'air est frais et le climat intérieur est humide, tandis que 16,67 % des habitants considèrent l'air frais mais avec un climat très humide. De même, un pourcentage équivalent d'habitants trouve l'air frais avec un climat ni trop humide ni trop sec.

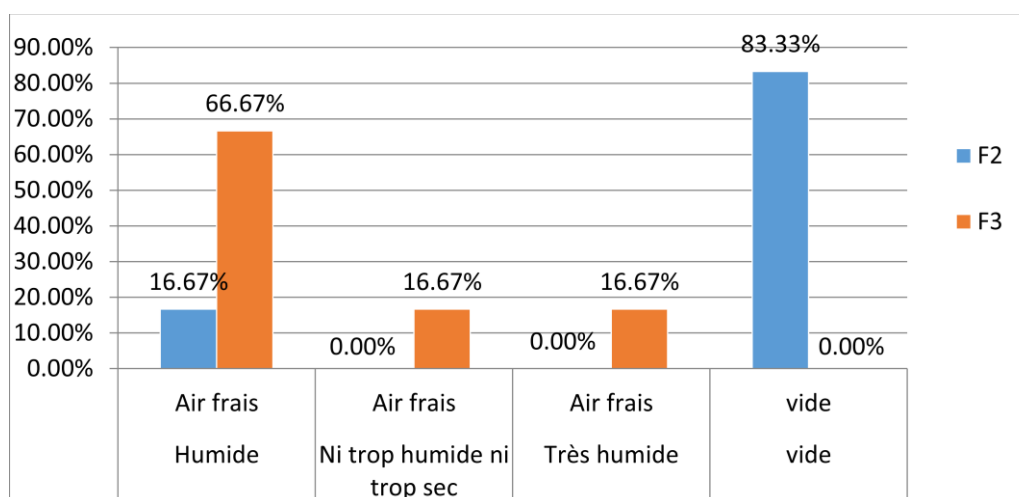


Figure 6.13 Répartition de la qualité du climat intérieur en fonction des logements. (Source : l'auteur)

g) Le confort thermique en hiver :

A la question « *Durant l'hiver, Comment ressentez-vous l'air ambiant de votre appartement ?* », les réponses entre les différents appartements se rapproche par « *Froid* », 66.67% des habitants du logement F3 orienté sud déclarent avoir froid contre 33.33% d'habitants déclarent avoir « *très froid* » et 50% des habitants des logements F3 orienté Nord/Ouest déclarent avoir « *Froid* » contre 16.67% de ceux qui ont déclaré avoir « *un peu froid* » (voir la fig. 6.14).

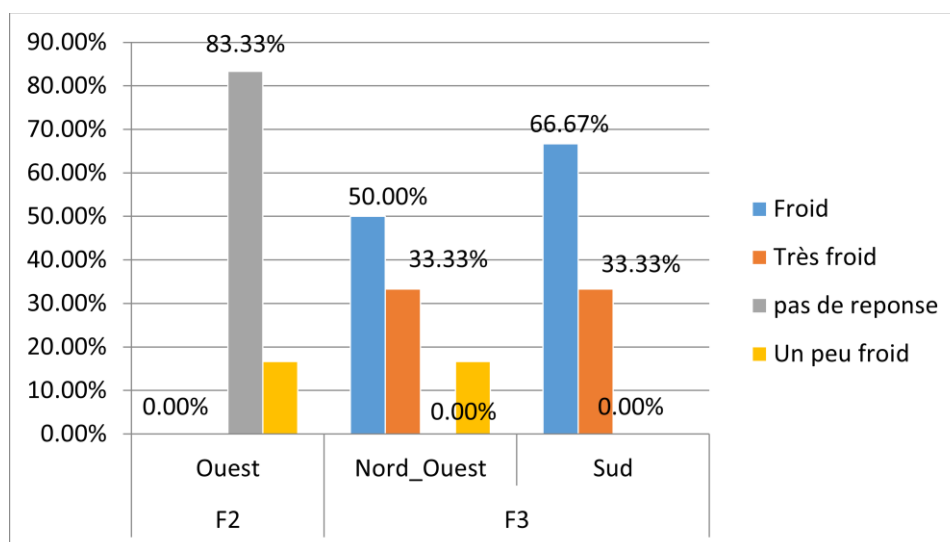


Figure 6.14 Répartition de la sensation du froid en fonction des logements et leur orientation. (Source : l'auteur).

Pour les deux questions "En hiver, la pièce la plus chaude est ?" et "En hiver, la pièce la plus fraîche est ?", la pièce la plus chaude est le séjour pour plus de 80 % de tous les habitants, et la pièce la plus fraîche est la chambre 1 pour tous les logements (fig. 6.15).

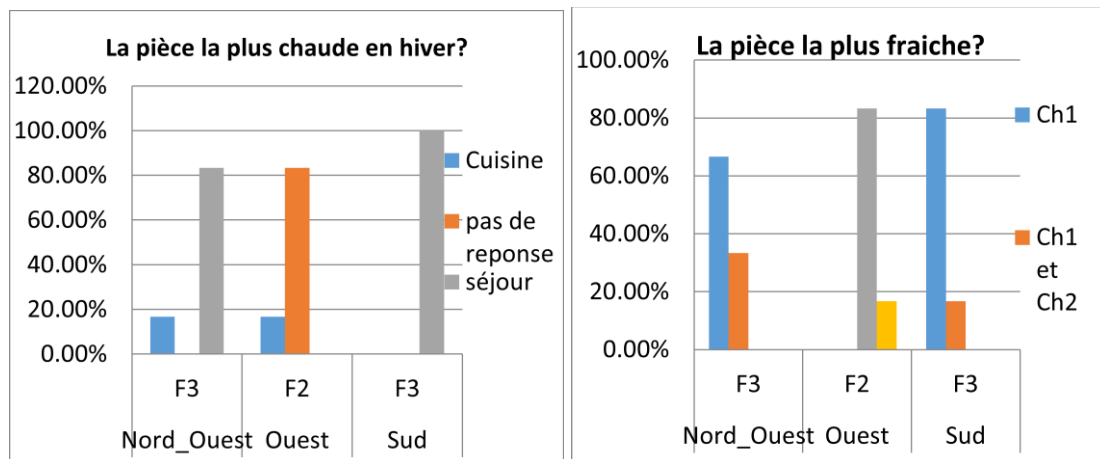


Figure 6.15 Répartition de la sensation du froid et du chaud dans les pièces en fonction des logements et leur orientation. (Source : l'auteur).

Les occupants interrogés des logements assurent, par le biais de cette enquête, que leur séjour est la pièce la plus chaude en hiver en raison de son ouverture sur le hall chauffé par une poêle à gaz. Quant à la chambre 1, elle est considérée comme la plus fraîche, étant donné qu'elle est située au fond du couloir, loin du chauffage et davantage exposée à l'extérieur. De plus, 72,22 % des habitants affirment que leur système de chauffage n'est pas suffisant.

h) Le comportement hivernal :

Le chauffage d'appoint : Tous les logements de cette résidence sont dotés d'un système de chauffage d'appoint à poêle à gaz souvent installé dans le hall, le chauffage se met en marche à partir du mois Décembre (pour cette année) jusqu'au mois de Mars.

L'utilisation du chauffage : la majorité des résidents sondés utilisent leur chauffage pendant la nuit et 33.33% du reste l'utilisent toute la journée, d'autres habitants l'utilisent parfois la nuit (voir fig. 6.16).

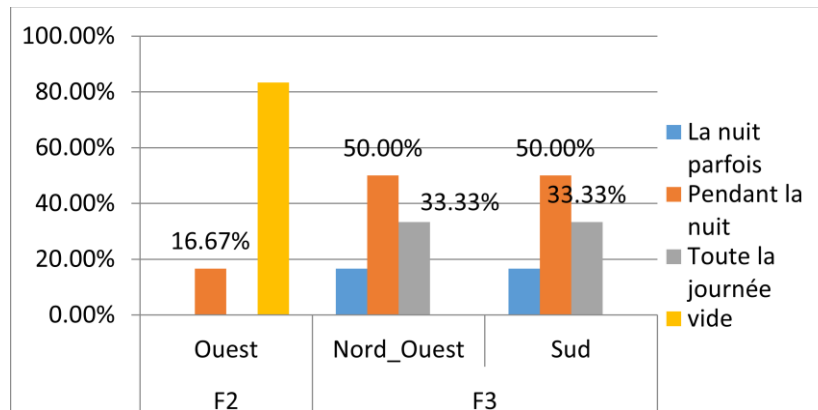


Figure 6.16 Répartition des réponses sur l'utilisation du chauffage. (Source : l'auteur).

i) Le cout du chauffage :

Pour environ 61% des résidents, le cout du chauffage de leur appartement est élevé (voir fig. 6.17), cependant 11% des habitants payent une facture du chauffage raisonnable.

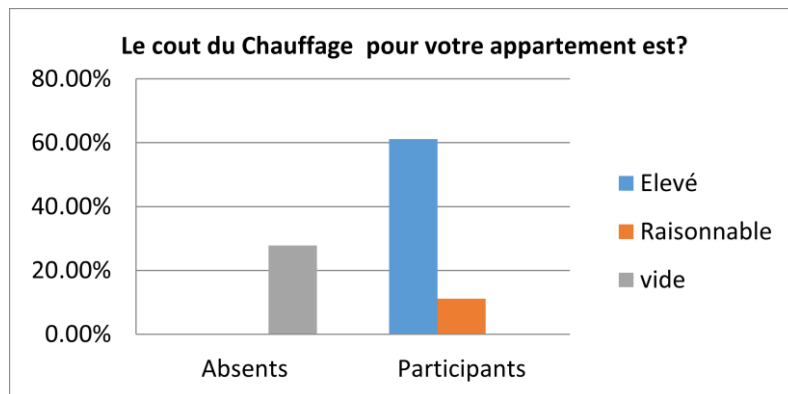


Figure 6.17 Répartition des réponses sur le cout du chauffage. (Source : l'auteur).

j) L'aération des appartements :

Le comportement hivernal est sensiblement identique d'un appartement à l'autre (voir fig. 6.18), 61.11% des personnes sondés ouvrent leurs fenêtres la journée pour aérer l'appartement et 55.56% ferment les volets dans toutes les chambres pendant la nuit.

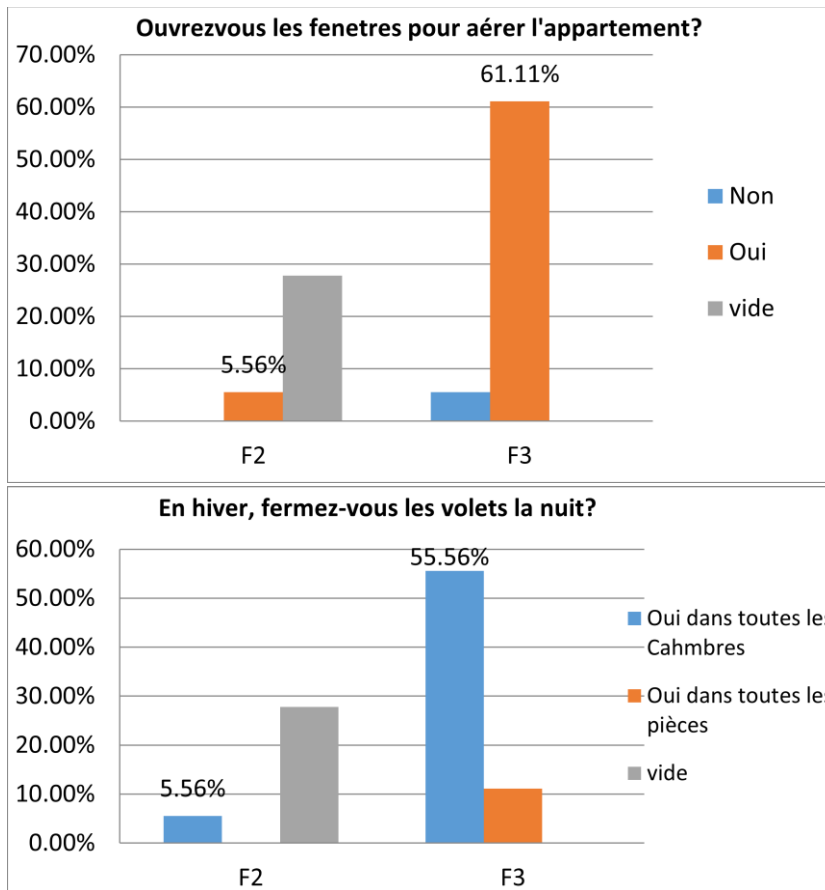


Figure 6.18 Pourcentage des habitants (a)ouvrant les fenêtres pour aérer l'appartement et (b) fermant les volets la nuit. (Source : l'auteur).

k) Le confort thermique en été :

À la question "Durant l'été, comment ressentez-vous l'air ambiant de votre appartement ?", les réponses varient entre les différents appartements mais se rapprochent majoritairement de la réponse "chaud". En effet, 66,67 % des habitants du logement F3 orienté sud déclarent avoir chaud, tandis que 16,67 % déclarent avoir "ni chaud ni froid". Pour les habitants des logements F3 orientés Nord/Ouest, 50 % déclarent avoir chaud, et 33,33 % déclarent avoir "ni chaud ni froid". En outre, 16,67 % des habitants de tous les appartements déclarent avoir "un peu chaud" (voir la fig. 6.19).

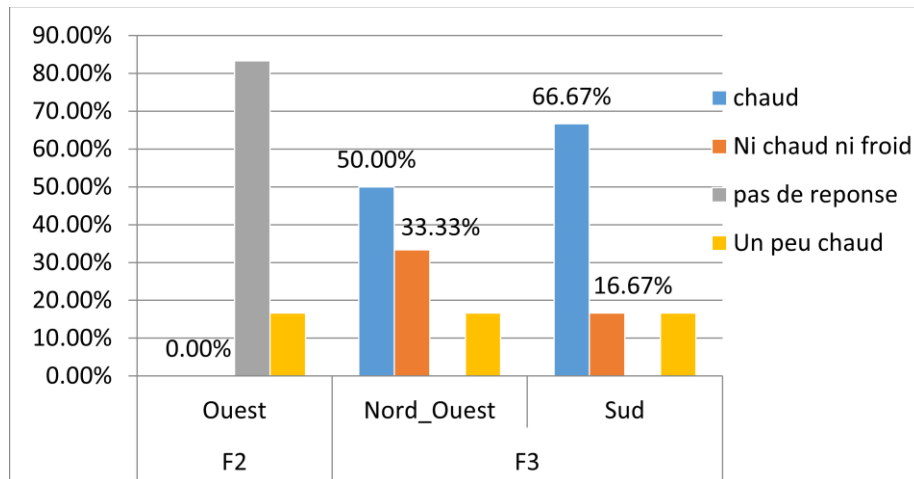


Figure 6.19 . Répartition de sensation de la chaleur en fonction des logements et leur orientation. (Source : l'auteur).

Pour les deux questions « *En été la pièce la plus chaude est ?* » et « *En été la pièce la plus fraîche est ?* », la pièce la plus chaude correspond à la chambre 2 (elle se trouve entre le séjour et la chambre 1) pour 83.33% des occupants du F3 orienté sud et pour 66.67% des occupants F3 orienté Nord-Ouest. Un pourcentage d'insatisfaction de 16.67% d'habitants qui trouvent les deux chambres chaudes et parfois toutes les pièces sont chaudes au moment des canicules d'été.

Les habitants des logements sondés assurent par cette enquête (voir fig. 6.20) que leur séjour est la pièce la plus fraîche en été du fait qu'il est exposé aux brises de mer et parfois durant l'été toutes les pièces sont fraîches et confortable par l'effet de la ventilation naturelle.

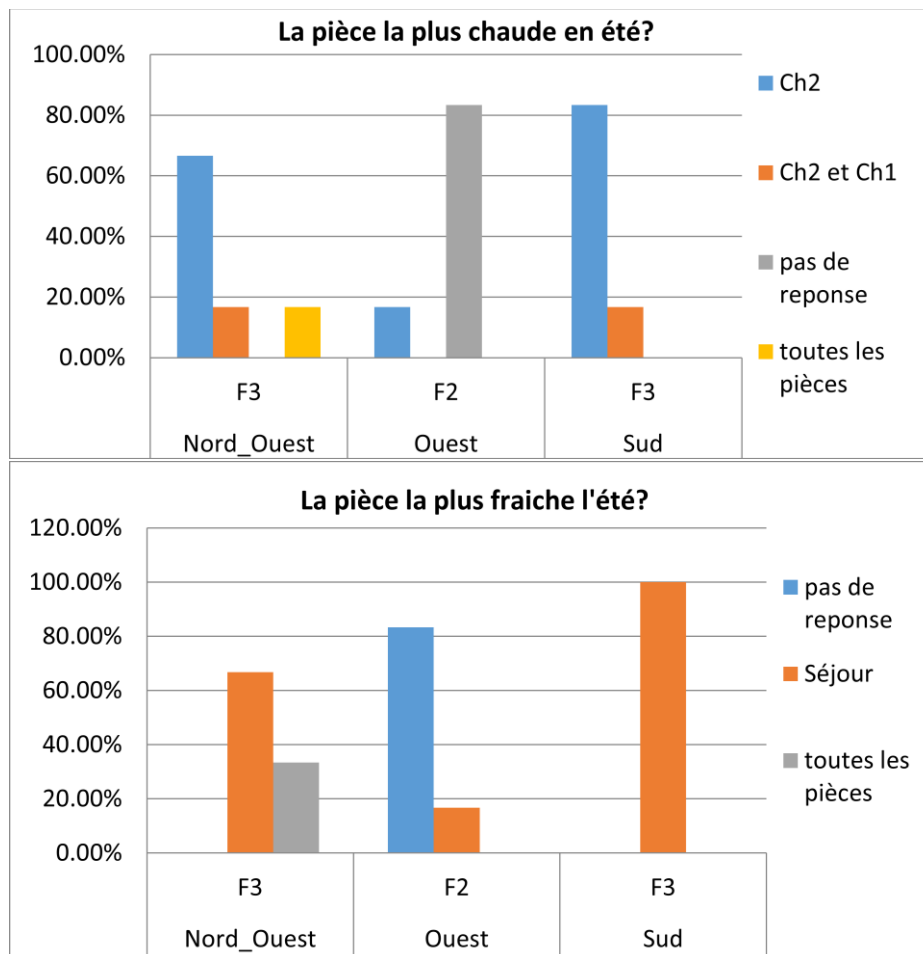


Figure 6.20 Répartition de la sensation de chaleur en été dans les pièces en fonction des logements et leur orientation. (Source : l'auteur).

1) Le comportement estival :

Aux questions « *Possédez-vous un système de climatisation ?* » et « *Possédez-vous un ventilateur ?* », 66.67% des habitants du F3 orienté sud confirment avoir un climatiseur placé dans le hall contre 50% de même pour les logements F3 Nord-Ouest, tant que pour le ventilateur les habitants pour ce cas déclarent avoir un ventilateur à 33.33% cela améliore leur confort thermique et 50% à avoir un ventilateur pour les F3 orientés sud. Les logements F3 orientés sud pour cette résidence utilisent plus de climatiseur et ventilateur par rapport aux mêmes logements orientés Nord-Ouest (voir fig. 6.21).

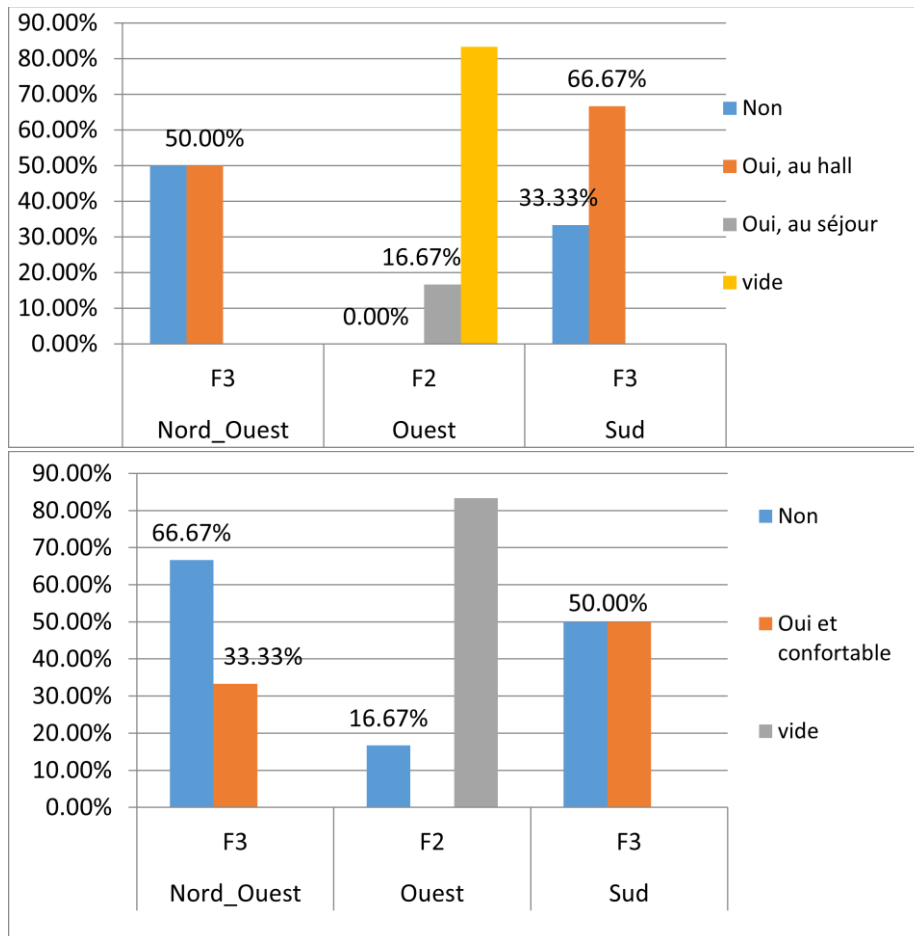


Figure 6.21 Répartition des réponses sur la possession d'un (a) climatiseur et (b) d'un ventilateur en fonction des logements et leur orientation. (Source : l'auteur).

m) L'utilisation de la climatisation :

33.33% des occupants des F3/sud utilisent leur climatiseur que pendant la période caniculaire d'été pendant la nuit ou bien l'après-midi, par contre la moitié des occupants des F3/Nord-Ouest n'utilisent pas leur climatiseur que parfois à 33.33% durant la nuit (voir fig. 6.22)

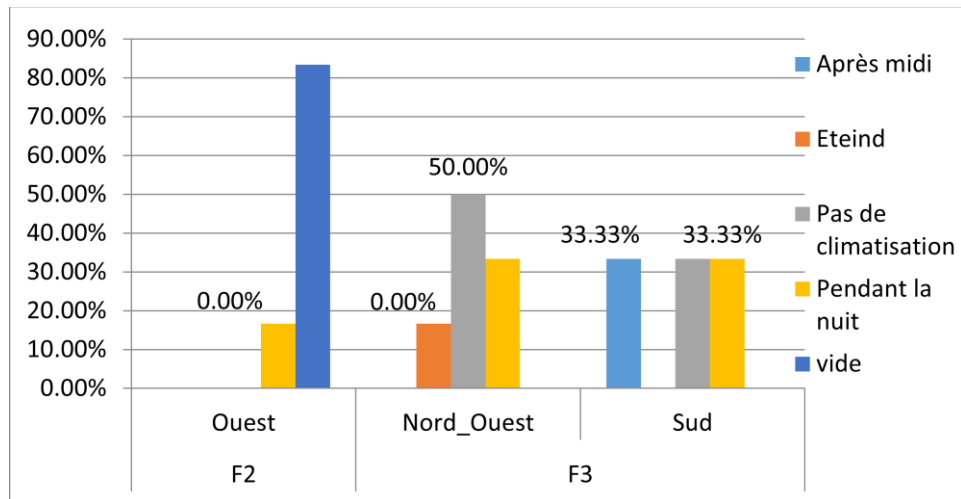


Figure 6.22 Répartition des réponses sur l'utilisation du climatiseur en fonction des logements et leur orientation. (Source : l'auteur).

n) Le cout du rafraichissement :

Pour environ 50% des résidents sondés, le cout du rafraichissement de leur appartement en été est élevé (voir fig. 6.23), cependant 16.67% des habitants affirment que le cout de rafraichissement est raisonnable.

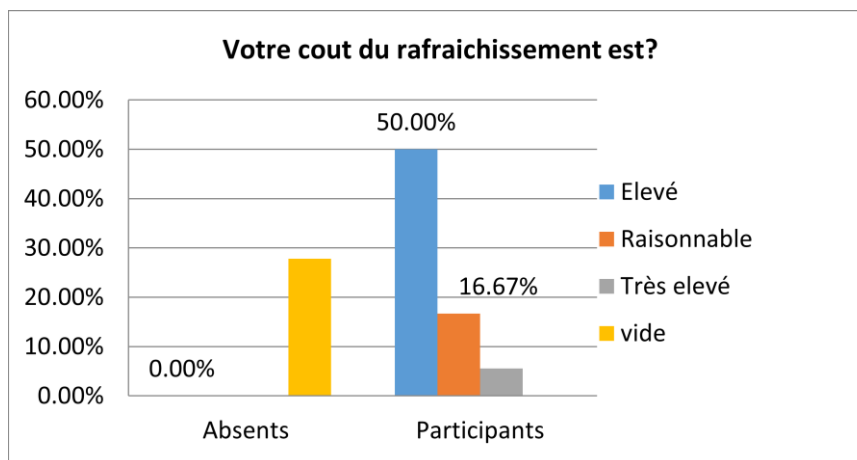


Figure 6.23 Répartition de réponses sur le cout du rafraichissement. (Source : l'auteur).

o) L'ouverture des fenêtres :

En été, les résidents déclarent ouvrir fréquemment les fenêtres "le matin" à hauteur de 83,33 %, puis les refermer l'après-midi pour se protéger du rayonnement solaire. Cependant, 16,67 % des habitants ouvrent les fenêtres "le matin, le soir et la nuit" (voir fig. 6.24). Pour d'autres, ils déclarent ne pas ouvrir en raison du bruit provenant de la rue.

Avec les fenêtres ouvertes, les mouvements d'air sont présents à 72.22% de résidents qui confirment la fréquence du mouvement de l'air par la réponse «Oui, beaucoup», 66.67%

CHAPITRE VI : EXPLORATION DES CAS D'ETUDE

de résidents ne sont pas dérangés par ces mouvements d'air, contre 5.56% les trouvent dérangeant.

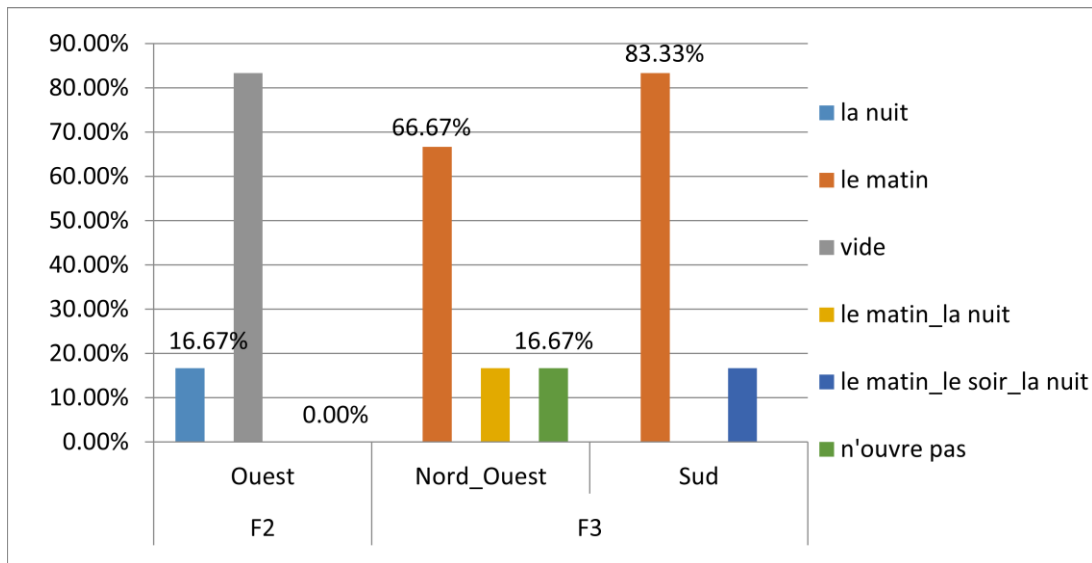


Figure 6.24 Répartition de réponses sur l'ouverture des fenêtres. (Source : l'auteur).

66.67% de résidents trouvent la consommation d'énergie de leur appartement moyen et 5.56% trouvent leur appartement énergivore. Les raisons économiques sont la principale motivation pour réduire la consommation d'énergie.

p) Participation au bâtiment à haute performance énergétique (amélioration souhaités) :

Tous les résidents interrogés sont actifs et intéressés par le principe de haute performance énergétique des bâtiments. Selon les réponses, 72,22 % des participants ont déclaré que la qualité d'isolation thermique de leurs logements était "faible". Une majorité de 44,83 % des participants envisagent l'amélioration des parois comme première intervention, tandis que 37,93 % des résidents suggèrent l'amélioration des fenêtres, et 13,79 % pensent aux systèmes de chauffage et de climatisation (voir fig. 6.25).

De plus, les résidents ajoutent en commentaires qu'après la réception des logements, des travaux de maçonnerie ont été indispensables pour un certain confort minimal. Il s'agit de refaire les revêtements des murs intérieurs en remplaçant l'enduit par le ciment ou d'autres matériaux, ainsi que de remplacer les portes et les fenêtres par d'autres plus étanches, dans la mesure où leur situation économique le permet.

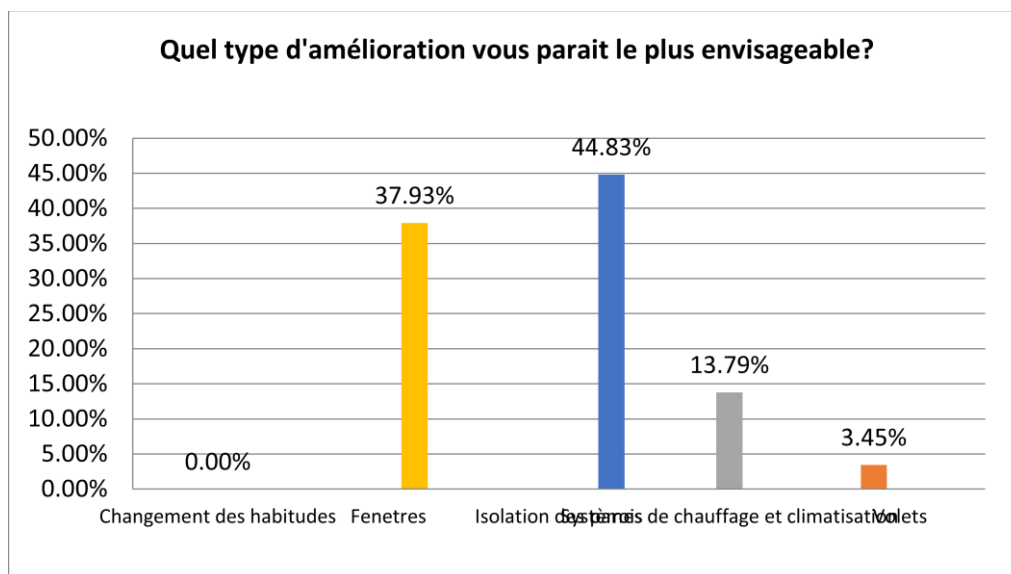


Figure 6.25 Répartition des réponses à la question « Quel type d'amélioration vous paraît le plus envisageable ? ». (Source : l'auteur).

q) Conclusion de l'enquête :

L'enquête réalisée auprès des habitants du bâtiment résidentiel présente un taux de participation de 72,22 % pour les 13 logements répartis sur différents étages. La majorité des participants occupent des logements de type F3 avec une orientation Nord-Ouest ou Ouest. Par conséquent, les logements de type F2 orientés vers l'Ouest ne peuvent pas être pris en compte pour l'instrumentation.

Parmi tous les logements, le confort ressenti semble être similaire : plus de la moitié des interrogés trouvent leurs logements confortables en toutes saisons, bien qu'il fasse froid en hiver. Parallèlement, la majorité des participants perçoivent l'ambiance thermique comme chaude en été.

En moyenne, le confort en hiver est le plus critiqué, comme en témoigne le comportement des habitants pour chauffer et rafraîchir leur appartement. Tous les logements possèdent un chauffage qui est mis en marche pendant la nuit ou la journée, au moins durant trois mois en hiver. Cependant, le système de climatisation n'est utilisé que parfois lors des jours de canicule. De plus, la moitié des habitants ne possèdent pas de climatiseur et préfèrent recourir à la ventilation naturelle ou à l'utilisation de ventilateurs.

Concernant la section "améliorations souhaitées", la majorité des participants estime que la qualité d'isolation thermique de leur logement est très faible, et l'amélioration des parois est identifiée comme la première intervention indispensable pour le confort thermique.

6.2 Investigation du cas Résidence promotionnelle.

L'étude d'un deuxième bâtiment, plus amélioré, vise à évaluer son comportement thermique et sa performance énergétique, notamment en ce qui concerne l'utilisation de l'isolation et la maîtrise de l'étanchéité.

6.2.1 Présentation du bâtiment :



Figure 6.26 Résidence promotionnelle. (Source : l'auteur ; Photographie prise Décembre 2019)

Il s'agit d'une résidence à usage d'habitation comprenant 99 logements (voir Fig. 6.26). Cette résidence a été construite dans le cadre d'une promotion immobilière privée entre 2013 et 2016 à SIDI ALILBAHR, appartenant au même secteur que le premier cas d'étude. Les trois immeubles de la résidence sont organisés de manière linéaire, avec la façade principale du projet orientée vers la mer. Chaque étage du bâtiment R⁺⁸ comprend trois appartements par palier.



Figure 6.27 Plan de l'appartement d'étude. (Source : l'auteur).

CHAPITRE VI : EXPLORATION DES CAS D'ETUDE

Notre étude se concentre sur un appartement F3 du deuxième étage d'une surface de 100 m² (voir Fig. 6.27). Ce choix fait principalement référence aux conditions et aux scénarios du premier cas d'étude. À l'exception de la distribution intérieure des pièces et de leurs orientations, qui diffèrent dans ce cas, le système constructif est identique.

6.2.2 Caractéristiques des parois opaques et vitrées :

a) Les ouvertures extérieures :

L'appartement possède des portes fenêtres vers l'orientation Est au niveau des chambres et d'autres vers le Nord au niveau du séjour et la cuisine. Un seul type de porte fenêtre est utilisé dans toutes les chambres dont les caractéristiques sont représentées sur le tableau 6.5, les portes intérieures sont en bois et la porte d'entrée est en métal. Aucun système d'occultation n'a été associé au virage. Les balcons constituent des occultations horizontales fixes.

Table 6. 5 Coefficient K (en W/m² °C) des ouvertures (DTR C3.2, voir Annexe C).

Désignation de l'ouverture	Matériaux	Conductance K (w/m ² c)
Porte Fenêtre	PVC	0.318
Porte intérieur	Bois	2
porte d'entrée	Bois	4.5

b) Les parois opaques :

La présence d'un isolant thermique « laine de roche » au niveau des murs et l'utilisation d'hourdi en polystyrène pour le plancher se distingue dans ce deuxième cas, la séparation intérieure est avec le Placoplatre. Les caractéristiques thermo-physiques des parois opaques sont représentées sur le tableau 6.6 (les différentes valeurs sont extraites du document DTR C3.2).

Table 6. 6 Caractéristiques thermo-physiques des parois opaques

Élément	Matériaux Ext → int	Épaisseur (m)	Densité (kg/m ³)	Conductivité thermique	Résistance thermique
Mur extérieur	Mortier de ciment	0.02	2200	1.4	1.631
	Brique creuse	0.15	900	0.48	
	Laine de roche	0.05	18	0.047	
	Brique creuse	0.10	900	0.48	
	Enduit en plâtre	0.02	750	0.35	
Plancher intermédiaire	Carrelage	0.02	1900	1	0.794
	mortier bâtard	0.02	1900	1.15	
	Plancher à entrevous en polystyrène	0.20	830	0.28	
	Enduit en plâtre	0.02	750	0.35	

6.2.3 Le système du chauffage :

Le système de chauffage dans ce bâtiment est une installation de chauffage central comprenant une chaudière fonctionnant au gaz naturel, avec un réseau de diffusion de chaleur comprenant des radiateurs et un plancher chauffant. Les radiateurs, en aluminium, sont équipés d'une régulation par le biais d'une tête de radiateur thermostatique pour une performance optimale. Au niveau des chambres et du séjour, les radiateurs possèdent 6 éléments de chauffe, tandis que pour le hall, ils en possèdent 12.

Les radiateurs ont été mis en marche pendant la saison hivernale à partir du mois de décembre dans deux pièces principales : le séjour et la chambre.

6.2.4 Conclusion d'enquête :

L'enquête ne considère pas l'ensemble de la résidence du fait à l'accessibilité aux appartements et le taux de présence des habitants, en plus quelques caractéristiques se différencient entre les logements tels que le type de chauffage (installation du chauffage central entre trois logements)

Pour réaliser l'objectif principal et d'étudier la performance thermique et énergétique dans ce deuxième cas plus amélioré, l'enquête a été menée auprès des occupants de l'appartement étudié.

Tous les occupants interrogés trouvent leur logement confortable mais l'utilisation du chauffage est indispensable en hiver et le coût du chauffage est relativement élevé, notamment qu'ils préfèrent d'augmenter le chauffage au lieu de mettre plus de vêtement. En été, les habitants perçoivent l'ambiance thermique comme étant « ni froid ni chaud » et le climatiseur est utilisé parfois en été pas tous les jours, le coût de rafraîchissement est raisonnable, les mouvements d'air fortement présents améliorent le confort thermique intérieur.

Sur le volet « *améliorations souhaitées* », les habitants trouvent que leur consommation énergétique est moyenne, le plus envisageable pour améliorer la performance et le confort thermique du bâtiment est l'isolation des parois.

6.3 Étude expérimentale sur le confort thermique :

Le bâtiment d'étude ne possède pas un moyen de rafraîchissement actif (climatiseur) il est un bâtiment à ventilation naturelle, nous avons choisi d'utiliser la méthode du confort adaptatif et l'équation (2) considéré par le standard ASHRAI 55.

D'abord dans la phase expérimentale, nous analysons le confort par l'instrumentation placée à l'intérieur d'un appartement durant les trois jours les plus froids et plus chauds de l'année, puis nous étudions l'inconfort lié au chaud et lié au froid en calculant le nombre d'heures dont la température dépasse la limite décrite par l'équation (4) du confort adaptatif ce qui dépasse la limite d'acceptabilité du 90% des usagers.

6.3.1 Instrumentation in situ :

Afin de collecter les données pour évaluer le confort thermique dans chaque bâtiment d'étude, un appartement a été choisi sur la base du sondage au porte à porte : le taux de participation, la disponibilité et l'accessibilité totale à l'appartement.

Pour les campagnes de mesures, les trois pièces principales sont concernées à savoir r : le séjour, la chambre 1 (chambre des parents) et la chambre 2 (chambre d'enfants).

L'instrumentation in situ permet de mesurer quelques facteurs qui influencent les conditions du confort thermique, nous souhaitons obtenir les informations suivantes :

- ❖ Température de l'air.
- ❖ Humidité relative
- ❖ La vitesse de l'air,
- ❖ La température surfacique.

6.3.2 Descriptions des outils de mesures :

- a) Mesure de la température de l'air T (°C) et l'humidité relative HR (%)

Chaque pièce principale est instrumentée d'un enregistreur de données (Fig. 6.28) pour surveiller la température ambiante ainsi que l'humidité ambiante relative pour une collecte de données de mesures significatives, ils sont montés sur les murs intérieurs et rangés à la verticale à environ 1.10 m au-dessus du plancher.



Figure 6.28 L'enregistreur de données de température et d'humidité. (Source du Laboratoire EE)

Cet appareil est particulièrement efficace et se prête à des opérations de mesures de longue durée avec un cycle de mesure librement configurable de 1 seconde à 24 heures, les résultats de mesures sont mémorisés dans l'enregistreur et transférés au PC par moyen d'un câble USB après l'installation du logiciel d'enregistreur, les résultats s'affichent sous forme de tableaux ou de représentation graphiques .

b) Mesure de la température surfacique T_s ($^{\circ}\text{C}$) :

Le Thermomètre Infrarouge (sur la figure 6.29) est utilisé pour mesurer la température de surface en un endroit de chaque mur des pièces d'étude. L'utilisation de cet appareils comprend la mesure sans contact de température comprises entre $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$ et $+1000\text{ }^{\circ}\text{C}$. Cet appareil possède un capteur infrarouge qui reçoit le rayonnement thermique émis et réfléchi par la paroi et convertit cette information en valeur de température.

Avant d'effectuer les mesures, il est nécessaire de régler l'émissivité qui décrit la propriété des matériaux à rayonner de l'énergie, puis diriger l'ouverture de capteur infrarouge sur la paroi et appuyer sur la touche désignée. A considérer que plus l'objet à mesurer n'est petit, plus la distance au thermomètre doit être réduit.

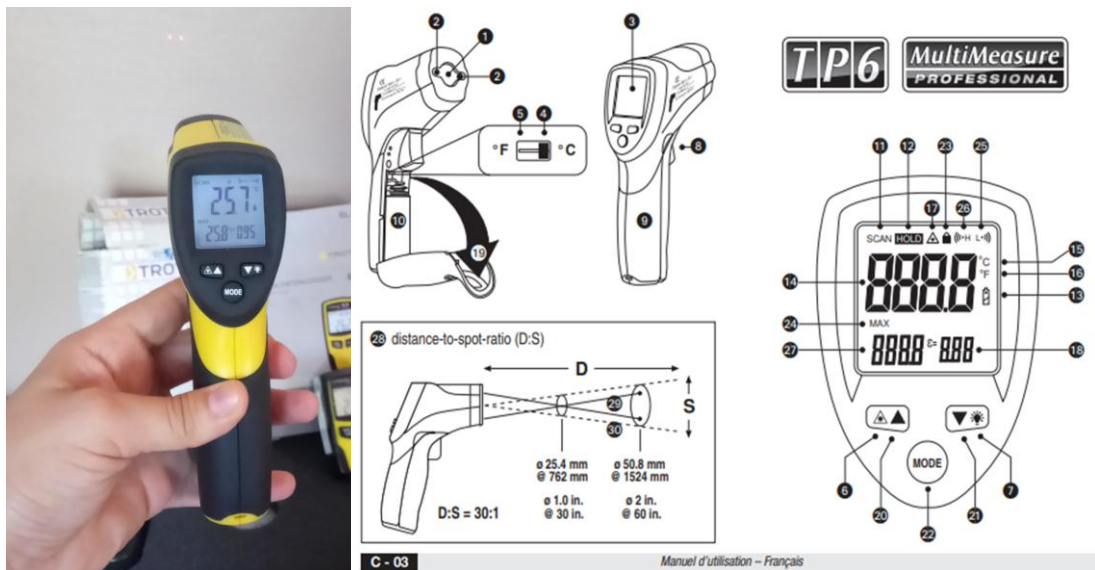


Figure 6.29 Thermomètre Infrarouge. (Source du Laboratoire EE)

c) Mesure de vitesse de l'air (m/s) :

L'Anémomètre thermique TA 300 est capable de mesurer des vitesses très faibles dites calme plat (1.85 km/h) et celles qualifiés de fortes tempêtes (env. 90 km/h), cet appareil (Fig. 6.30) possède un thermistor intégré pour les mesures de température. La tête du capteur est dotée d'un marquage qui doit être orienté contre le déplacement d'air pendant la mesure, les valeurs de mesure de la vitesse de l'air et de température s'affichent en tant que valeur numérique à l'écran.

Le débit de l'air est étudiée dans tout l'appartement afin d'identifier l'entrée et la sortie du flux d'air et les endroits les plus ventilés. Les pièces d'étude : le séjour, Ch. 1, Ch. 2 ont une façade exposée au vent et au moment de mesure les ouvertures sont maintenues ouvertes.



Figure 6.30 Anémomètre thermique TA 300. (Source du Laboratoire EE)

6.3.3 Déroulement de mesures :

a) Mesure en période hivernale :

La période de mesure pour l'hiver a été déterminée suite à l'analyse climatique basée sur les données climatiques de Bejaia. Les campagnes de mesures ont eu lieu pendant les trois jours les plus froids du mois de janvier, soit les 11, 12 et 13 janvier 2019. Pour les données horaires du climat extérieur durant la période d'investigation, les valeurs retenues proviennent de Meteonorm 7 sous format TMY.

Dans les bâtiments, les enregistreurs de données ont été installés sur place, et les débits d'air ont été mesurés manuellement dans chaque pièce. Pendant cette période, une enquête a été menée, et toute utilisation de chauffage a été consignée par les utilisateurs dans un tableau. Ces informations sont ensuite associées au profil d'occupation de l'appartement, ainsi qu'à l'ouverture, la fermeture ou l'occultation des fenêtres

b) Mesure en période estivale :

Les mesures sont effectuées de la même manière que pendant la période hivernale, sur une durée de trois jours, du 27 au 30 juillet 2019. En plus du relevé de la température ambiante, de l'humidité et de la vitesse de l'air, la température surfacique des parois verticales intérieures est également prise en compte.

Un enregistreur de données est installé au niveau de la loggia, à l'extérieur du salon, afin de mesurer la température et l'humidité relative extérieures.

6.4 Evaluation du confort thermique utilisant le modèle adaptatif du standard ASHRAE 55 :

Afin d'évaluer la performance thermique et le confort thermique des occupants dans les deux cas d'étude, nous utilisons l'approche adaptative du confort thermique (ASHRAE, 2017). Les équations (2) (4) sont appliquées durant la période de mesure pour l'évaluation :

$$T_{conf} = 0.31 T_{a\ out} + 17.8; T_c = 21.01^{\circ}C$$

$$\text{Limite supérieure d'acceptabilité 90\%} = 0.31 T_{a\ out} + 20.3\ ^{\circ}C \leq 23.51^{\circ}C$$

$$\text{Limite inférieure d'acceptabilité 90\%} = 0.31 T_{a\ out} + 15.3\ ^{\circ}C \geq 18.51\ ^{\circ}C$$

6.4.1 Résultat d'évaluation du confort durant l'été :

Durant la saison estivale, le bâtiment conventionnel sans isolation à ventilation naturelle a été instrumenté afin d'analyser la performance thermique à l'intérieur de chaque pièce.

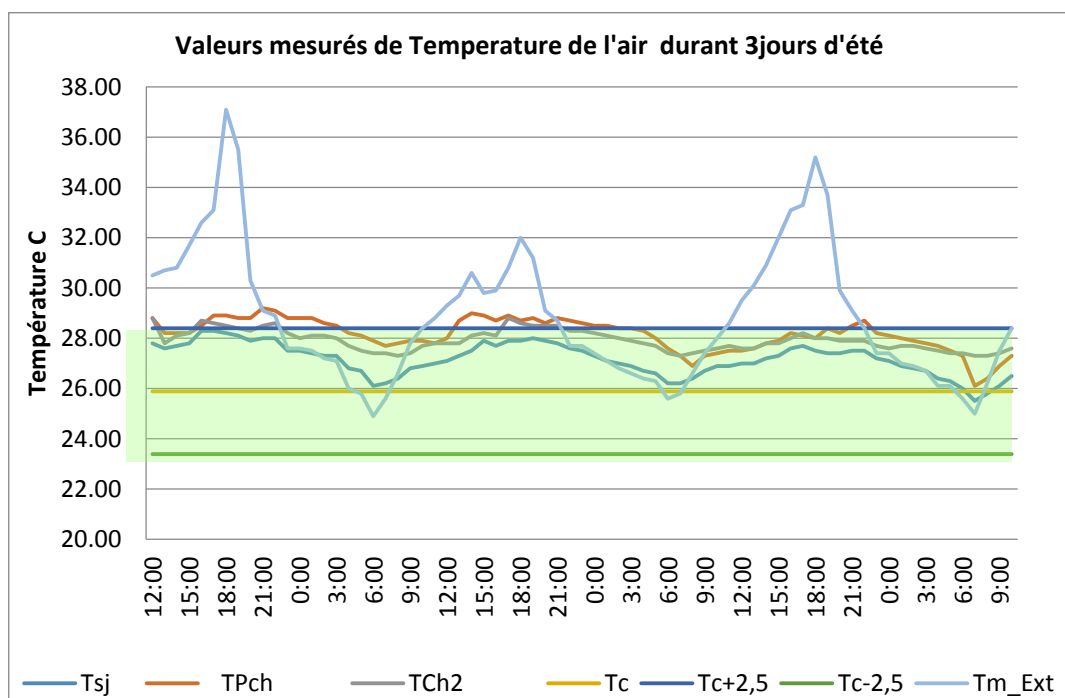


Figure 6.31 Évolution de la température de l'air et du confort thermique en été au niveau de toutes les pièces du bâtiment sans isolation, utilisant le standard Ashrae_55.

La figure 6.31 illustre les températures de l'air intérieur dans trois pièces principales. Toutes les valeurs de température se situent dans la zone du confort thermique adaptatif (inférieures à $T_{c-2.5}$), correspondant à 90 % d'habitants satisfaits. Cependant, au niveau de la Ch. 1, la température enregistrée dépasse la limite du confort adaptatif $T_{c+2.5}$ pendant 27 heures sur les 71 heures de l'expérience.

Le pic le plus élevé enregistré est de $29.2\ ^{\circ}C$. Lorsque la température extérieure atteint $37.1\ ^{\circ}C$, la température à l'intérieur de la Ch. 1 serait de $28.9\ ^{\circ}C$, moment où les occupants se trouvent en situation d'inconfort thermique. Ils adoptent alors des comportements pour se

rafraîchir, tels que l'ouverture des fenêtres, la mise en marche du ventilateur ou la baignade en plage.

Ce résultat illustre la situation du confort thermique à l'intérieur des pièces de cet appartement, soulignant que la ventilation naturelle constitue un moyen efficace de rafraîchissement, d'autant plus que la position du bâtiment et son orientation favorisent les brises marines. Cela procure une situation de confort à l'intérieur du logement.

Par la suite de cette étude, nous explorons la performance thermique en ce qui concerne la saison hivernale. De plus, l'investigation a été menée dans le bâtiment isolé, doté d'une enveloppe plus performante.

6.4.2 Résultat d'évaluation du confort en l'hiver pour les deux cas d'étude

Le confort thermique a été évalué dans les des deux cas d'étude : le bâtiment conventionnel (cas sans isolation) et dans le bâtiment amélioré (cas avec isolation+ étanchéité + chauffage central).

❖ Résultat pour le séjour :

La figure 6.32 montre les variations de température de l'air ($^{\circ}\text{C}$) au niveau des deux bâtiments étudiés, pour le séjour le chauffage été en marche pour les deux cas durant la période de l'expérience.

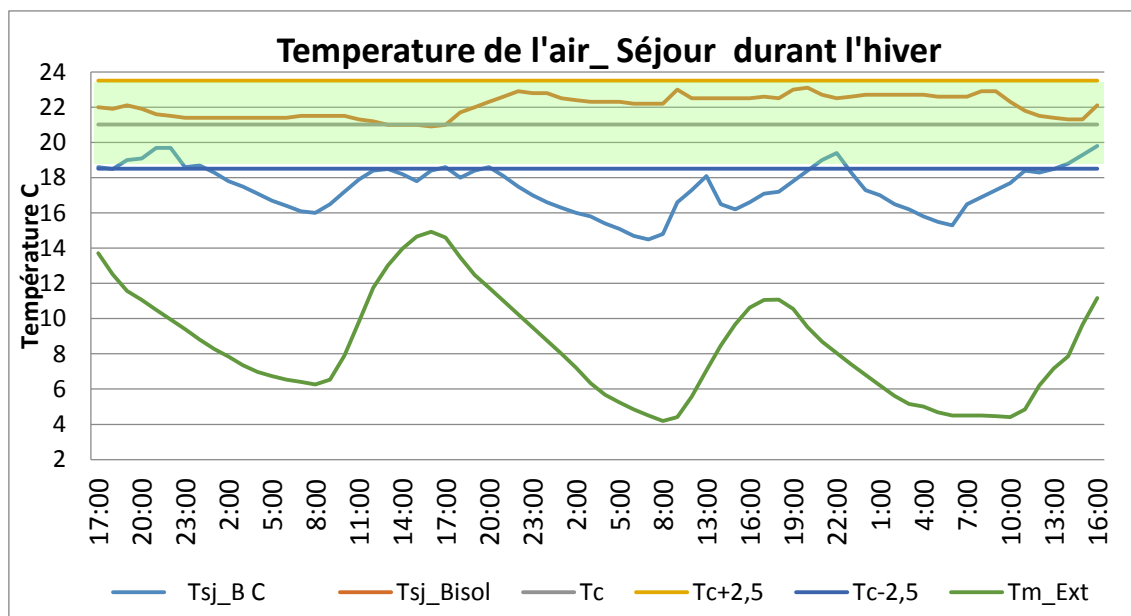


Figure 6.32 L'évolution de la température de l'air et le confort thermique dans les séjours en hiver selon le l'équation du confort adaptatif du standard Ashrae_55.

L'évolution du graphe de température du bâtiment conventionnel (Tsj_BC) montre que les valeurs de température accèdent parfois la limite inférieure 18.51 °C dans du confort thermique adaptatif (Tc-2.5), cela durant un nombre horaire de 21 heures sur 71 h du temps de l'expérience. Le pic de température 19.8 °C a été enregistré l'après-midi à part ce temps une baisse de température est remarquée dont la plus faible 14.5 °C a été enregistrée à 7 h du matin.

En revanche, l'évolution du graphe de la température du bâtiment isolé (Tsj_Bisol) montre des valeurs plus stables qui se situent dans la zone du confort adaptatif du standard ASHRAE_55 tout au long de la période d'expérience. La valeur la plus basse de température enregistrée est de 20.9 °C, et le pic de température enregistré est de 23.1 °C.

a) Résultat pour la chambre :

Deux chambres non chauffées et plus froides dans les deux bâtiments différents ont été choisies pour la discussion afin d'explorer les différences entre les deux pièces.

La première pièce est une chambre du bâtiment conventionnel sans améliorations, elle possède deux murs extérieurs avec une fenêtre au Nord-Ouest. Le graphe (Tch_BC) (voir Fig. 6.33) montre que les valeurs de température de l'air intérieur sont plus basses et ne se rapprochent guère de la limite inférieure du confort thermique adaptatif (Tc-2.5) durant toute la période d'expérience, sauf durant 3 heures de 20 h à 23 h. L'appareil de mesure a enregistré 18.5 °C pendant ce temps, et tous les occupants du bâtiment étaient présents, ce qui a augmenté les apports de chaleur internes, expliquant ainsi cette valeur. La température la plus basse, 13.10 °C, a été enregistrée vers 7 heures du matin.

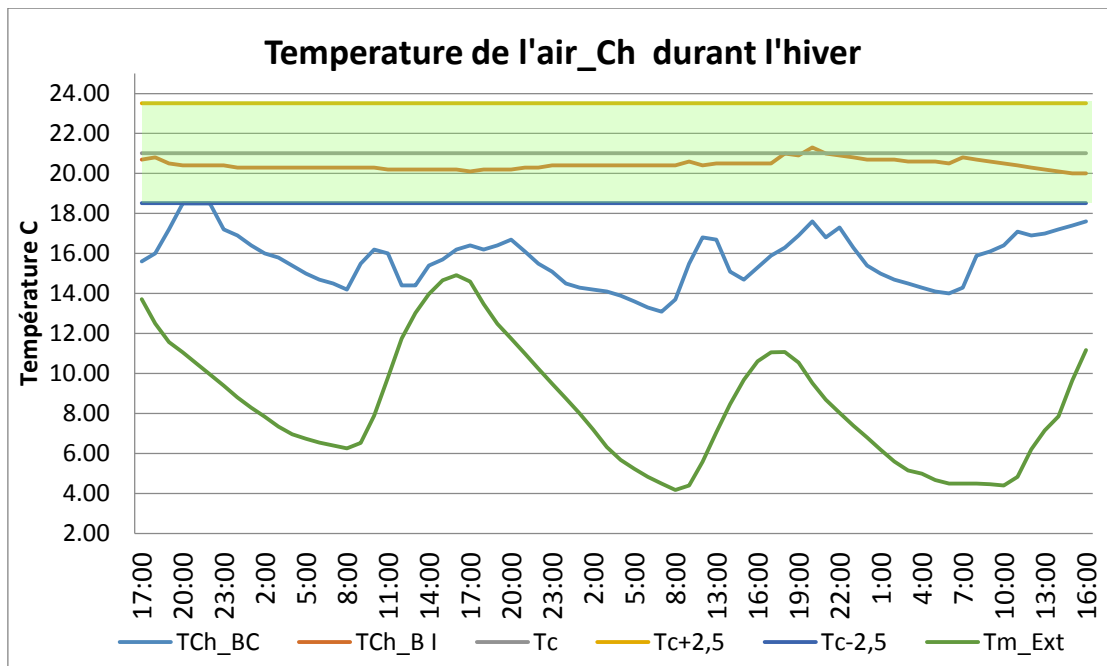


Figure 6.33 L'évolution de la température de l'air et le confort thermique dans les chambres en hiver selon le l'équation du confort adaptatif du standard Ashrae_55

Au niveau de la chambre du bâtiment isolé, le graphe TCh_BI indique que les valeurs de la température intérieure se maintiennent à la limite du confort thermique, à 21.01 °C, durant tout le temps de l'expérience, et la température la plus basse enregistrée est de 20 °C.

6.5 Evaluation de la consommation énergétique :

La deuxième étape de l'expérimentation consiste à analyser la consommation énergétique des deux bâtiments à travers les factures de SONELGAZ pour l'électricité et le gaz, par trimestre, sur une année.

6.5.1 La consommation énergétique du premier cas, logement social collectif

Le tableau 6.7 présente les résultats de la consommation en électricité et du gaz d'un appartement du logement social (bâtiment conventionnel) étudié

CHAPITRE VI : EXPLORATION DES CAS D'ETUDE

Table 6. 7 . La consommation d'Électricité et du Gaz du bâtiment conventionnel selon les factures SONELGAZ durant quatre trimestres.

	4 ^{ème} Trimestre	1 ^{er} Trimestre	2 ^{ème} Trimestre	3 ^{ème} Trimestre
Électricité (KWh/Th)	315	735	108	447
Mentant Ht	1136,14	3652,19	270,76	1771,32
Total électricité	1269,67	4321,29	295,13	2025,53
Gaz (KWh/Th)	1062,75	5742,75	165,75	0
Mentant Ht	264,25	2026,13	113,38	85,5
Total Gaz	288,04	2339,01	123,59	93,2
Totale Droit et taxes	200	250	175	250
Total des éléments Facture (1+2+3)	1775,71	7066,04	599,72	2392,73

D'après les résultats obtenus des factures, nous constatons que la valeur la plus élevée de la consommation énergétique a été enregistrée durant le 1er trimestre en hiver, couvrant les trois mois de décembre, janvier et février, avec 735 kWh d'électricité et 5742.75 kWh pour le gaz. Une consommation de 447 kWh a été enregistrée durant la saison estivale.

Sur une année, la demande énergétique relative au gaz naturel est plus élevée que celle de l'électricité. Le besoin en chauffage prédomine tout au long de l'année, comme le montre la figure 6.34.

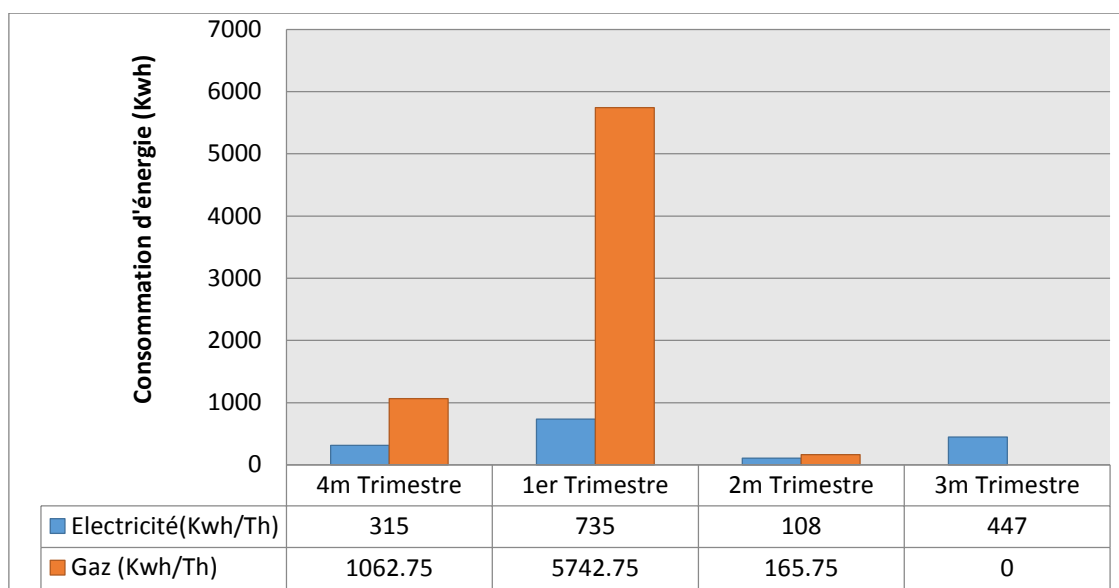


Figure 6.34 Consommation énergétique du gaz et d'électricité annuelle, selon les factures SONELGAZ.

6.5.2 La consommation énergétique du deuxième cas, Résidence isolée :

La facture d'électricité et de gaz pour chaque trimestre (voir le tableau 6.8) indique une consommation relativement plus élevée en hiver à partir de novembre (les 4^{ème} et 1^{er} trimestres, janvier, février, mars 2020) avec 473 kWh d'électricité et 4159 kWh pour le gaz. En été, la valeur reste autour de la consommation moyenne annuelle de l'appartement, soit 435 kWh d'électricité avec un minimum de 292.50 kWh pour le gaz.

Table 6. 8 La consommation d'Électricité et du Gaz de la résidence isolée selon les factures SONELGAZ durant trimestres.

	4 ^{ème} Trimestre	1 ^{er} Trimestre	2 ^{ème} Trimestre	3 ^{ème} Trimestre
Électricité (KWh/Th)	499	473	484	435
Montant Ht	2021.55	1916.21	1949.37	1713.58
Total électricité	2323.31	2217.97	2237.41	1956.82
Gaz (KWh/Th)	3159	4159	1423.50	292.50
Montant Ht	986.17	1298.35	371.59	134.70
Total Gaz	1101.46	1413.64	405.04	146.83
Totale Droit et taxes	250	250	250	250
Total des éléments	3711.77	3931.61	2921.45	2377.65
Facture (1+2+3)				

CHAPITRE VI : EXPLORATION DES CAS D'ETUDE

À travers l'analyse des résultats des factures, la consommation de gaz naturel est plus élevée tout au long de l'année, à l'exception de l'été, où elle est plus faible par rapport à la consommation d'électricité (voir Fig. 6.35).

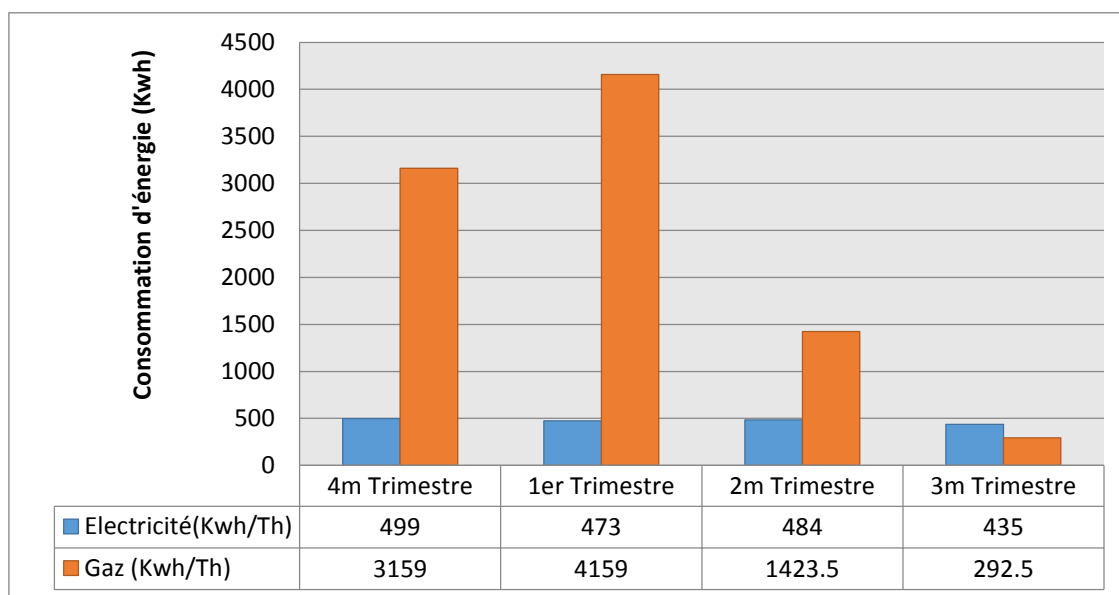


Figure 6.35 Consommation énergétique du gaz et d'électricité annuelle, selon les factures SONEGGAZ.

La moyenne de consommation entre les deux appartements : La consommation énergétique totale dans les deux appartements étudiés se situe dans une fourchette entre 7000 et 9000 kWh pour le gaz et entre 1600 et 1800 kWh pour l'électricité. Malgré l'isolation thermique et des ouvertures plus performantes, la résidence isolée présente une consommation énergétique plus élevée par rapport au logement social, avec 12 % de plus de gaz et 8 % de plus d'électricité (voir Fig. 6.36).

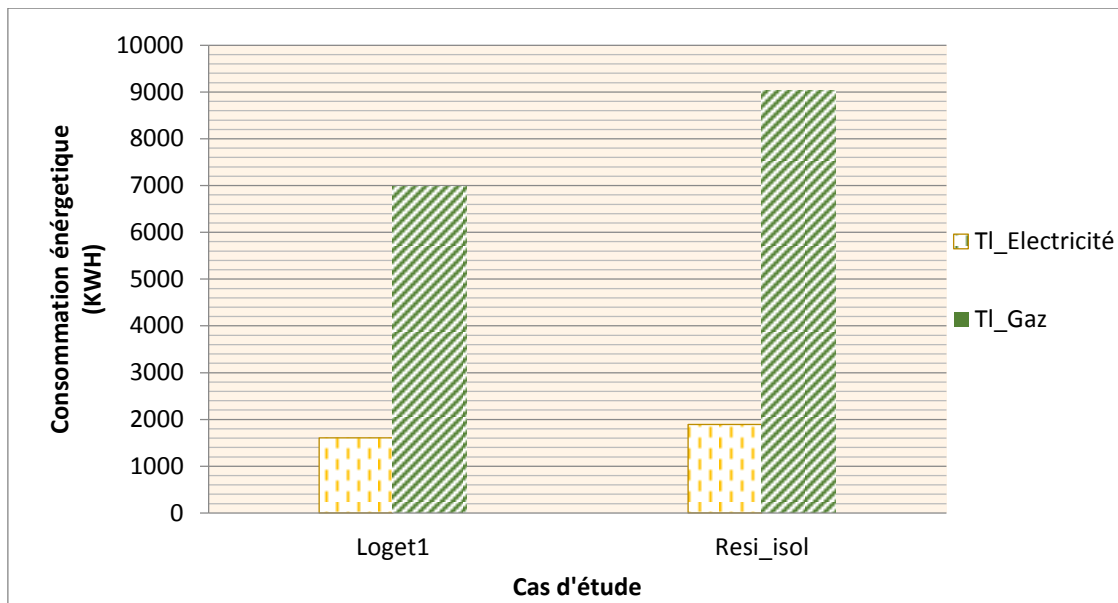


Figure 6.36 Comparaison de la consommation énergétique entre les deux cas d'étude.

Conclusion :

Dans ce chapitre, une exploration de deux cas d'étude a été menée, portant sur un logement social dont le modèle est reproduit sur l'ensemble du territoire du pays, et un logement en résidence promotionnelle doté d'une enveloppe plus performante. Les résultats confirment une défaillance en matière de confort thermique et de consommation énergétique pour l'immeuble de logements collectifs construits sans intégration de normes de performance énergétique.

Cette investigation met en évidence qu'un bâtiment dans ce type de climat est confronté à des conditions plus défavorables, avec des situations d'inconfort plus marquées durant l'hiver que pendant l'été, en particulier étant donné que la majorité des pièces n'accède guère à la zone du confort adaptatif standard ASHRAE_55 en hiver. Selon l'enquête, plus de la moitié des personnes interrogées trouvent leurs logements confortables toute l'année, mais le froid hivernal est le facteur le plus gênant. Le confort thermique en hiver est particulièrement remis en question, et cela se reflète dans le comportement des habitants qui utilisent davantage de gaz naturel pour chauffer leurs appartements.

L'analyse de la performance thermique révèle une différence entre les deux bâtiments (cas conventionnel et cas isolé). Pour le bâtiment amélioré par l'isolation, l'étanchéité des ouvertures, le confort thermique a été atteint dans toutes les pièces, même sans utilisation du chauffage. Dans ce cas, le chauffage améliore davantage le confort thermique. Cependant, la situation du confort thermique dans le bâtiment conventionnel est critique, et

CHAPITRE VI : EXPLORATION DES CAS D'ETUDE

la température atteint rarement la limite inférieure de 18.51 °C, malgré l'utilisation du chauffage au niveau du hall d'entrée de l'appartement. Dans ce cas, le système de chauffage reste inefficace pour l'ensemble de l'appartement, augmentant de 5 °C à 3 °C dans une partie du bâtiment.

Ce résultat démontre que le confort thermique a été atteint dans la résidence isolée grâce à ses caractéristiques telles que l'isolation des parois, le double vitrage et l'étanchéité à l'air, améliorant ainsi la performance thermique du bâtiment.

L'analyse de la consommation énergétique dans les deux cas d'étude indique que la demande énergétique relative au gaz naturel est plus élevée que celle de l'électricité. Par ailleurs, la valeur la plus élevée de la consommation énergétique a été enregistrée durant le 1er trimestre en hiver. En comparant les deux, l'appartement en résidence isolée consomme plus d'énergie, environ 109.3 kWh/m²/an, contre 95 kWh/m²/an pour l'appartement en logement social.

Ce résultat confirme, d'autre part, que la performance énergétique ne dépend pas uniquement de la performance de l'enveloppe, comprenant l'isolation thermique et l'étanchéité des ouvertures. La consommation énergétique élevée de la résidence isolée peut être liée à des lacunes au niveau de plusieurs paramètres, notamment les pratiques des occupants, comme confirmé dans le travail de Cécile Batier en 5016, où l'investigation sur le terrain a révélé que les différences de confort thermique et de consommation énergétique sont liées aux pratiques des occupants.

D'autres facteurs d'influence incluent l'installation et le système de chauffage, le système de production d'eau chaude sanitaire, une installation de production d'énergie renouvelable, et une conception du bâtiment à haute performance énergétique.

**CHAPITRE VII : EVALUATION DES STRATEGIES DE
PERFORMANCE ENERGETIQUE**

CHAPITRE VII : EVALUATION DES STRATEGIES DE PERFORMANCE ENERGETIQUE

Introduction

Au Chapitre IV, l'analyse des Living-lab et bâtiments ZEB déjà réalisés conclue que les stratégies plus populaires d'optimisation de l'efficacité énergétique sont : l'isolation thermique (murs, planchers, fenêtres), le système VRC ventilation mécanique à récupération de chaleur et l'utilisation de capteurs solaires thermiques et panneaux photovoltaïques avec les réservoirs d'eau chaude pour l'approvisionnement en énergie renouvelable.

Les résultats scientifiques sur l'évaluation de bâtiments à haute performance et NZEB démontrent la performance thermique et énergétique de certains systèmes énergétiques comme CVC intégrée en combinaison avec les aspects bioclimatique et stratégies passives. L'objectif de ce chapitre est d'évaluer l'impact des stratégies de performance énergétique et thermique sur le cas d'étude plus critique (logement social) à travers une configuration optimale issue des stratégies des bâtiments ZEB méditerranéen.

Pour cela, des recommandations d'améliorations ont été dégagées en chaque partie et élément du bâtiment à savoir :

- l'amélioration de l'enveloppe du bâtiment par l'intégration d'un isolant thermique au niveau des : murs, planchers et toiture,
- Amélioration des fenêtres à savoir le type du vitrage correspondant,
- Explorer l'impact des stratégies passives sans consommation énergétique et à faible impact sur l'Environnement : la protection solaires, ventilation naturelle.

Dans le Chapitre précédent, l'expérimentation menée sur le logement social collectif et la résidence promotionnelle a désigné que l'inconfort thermique a été perçu largement dans le premier cas (bâtiment conventionnel) en plus il est énergivore. Pour le deuxième cas la résidence dotée d'isolation au niveau des murs et planchers avec des ouvertures plus étanches à l'air, le confort thermique a été atteint dans toutes les pièces, cependant sa consommation énergétique reste relativement plus importante que le cas conventionnel.

La première partie de ce chapitre aborde l'étape calibration et validation après avoir créée le modèle de simulation numérique afin d'exécuter une étude paramétrique utilisant le logiciel TRNSYS. La dernière partie comprend l'évaluation de l'impact des stratégies sur la consommation énergétique et le confort thermique du bâtiment de référence (Cas logement social).

7.1 Modélisation et simulation :

Le logiciel TRNSYS version 16 "TRaNsient System Simulation Program" est utilisé pour évaluer la performance énergétique du bâtiment avant et après l'intégration des isolants écologiques et techniques proposés ; il est un programme de simulation des systèmes transitoires caractérisé par son approche modulaire.

Ce logiciel est construit à partir des listes de sous programmes en Fortran qui est un langage utilisé pour compiler les différents modules, il propose de spécifier les composants qui constituent le système et de réaliser une connexion entre ces modèles. Chaque composant (Type) est caractérisé par un certain nombre de paramètres « input et output ».

La connexion entre les modèles est réalisée via un diagramme de flux et le paramètre « output » du type. TRNSYS a été identifié comme étant le programme de simulation énergétique le plus approprié et peut être utilisé sur n'importe quel système thermique (Lamrani, 2019).

La simulation est utilisée en deux étapes :

- D'abord modéliser le bâtiment conventionnel (crier un modèle proche de la réalité) et étudier la différence entre les résultats de l'expérimental et la simulation)
- Étudier l'impact des stratégies de performance énergétique : l'impact de l'isolation thermique, l'impact de fenêtres ou vitrage performantes

7.1.1 Le model de simulation :

Le bâtiment a été modélisé sur le logiciel en définissant six différentes zones du bâtiment, les données d'entrées du modèle numérique constituent : les propriétés thermiques et composantes réels du bâtiment ; les protections solaire, la ventilation, les scénarios d'occupation et d'usage. L'étude se focalise nécessairement sur trois pièces principales du bâtiment. Le fichier de données météorologiques horaires TMY du Meteonorm 6 pour Bejaia est utilisé pour représenter les conditions météorologiques extérieures durant l'hiver, durant l'été la température de l'air et l'humidité relative ont été mesuré sur site.

Les valeurs mesurées in situ de la température de l'air et l'humidité relative permettent de calibrer et valider le modèle numérique de simulation entre le 11 au 14 janvier 2019 en 71 heures d'expérience qui correspond à l'heure de simulation [240-312 h] en hiver et du 27 au 30 Juillet 2019 entre [4980-5050 h] heure de simulation.

7.1.2 Calibration et validation du model

Pour évaluer la performance des stratégies appliquées par la simulation numérique, la calibration est une étape essentielle pour la validation et création d'un modèle de simulation fiable à prédire les resultats de chaque paramètre.

Nous utilisons en référence deux indices statistiques d'ASHRAE pour valider le modèle de simulation: NMBE (normalized mean bias error), CVRMSE (Coefficient of variation of the root mean square error)(ASHRAE Guideline, 2002). Le NMBE évalue la différence moyenne entre simulation et mesures (Eq 1), le CVRMSE exprime la capacité du modèle à représenter la réalité (Eq 2).

$$NMBE = \frac{\sum_{i=1}^{Np}(Ym-Ysi)}{\bar{y}_m * (N-P)} * 100 \dots\dots\dots 1$$

$$CV (RMSE) = \frac{1}{\bar{y}_m} \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{Np}(Ym-Ysi)^2}{(N-P)}} * 100 \dots\dots\dots 2$$

Ym et Ysi sont les données mesurées et simulées respectivement à l'intervalle de temps I et (N-P) est le nombre total de valeurs de données utilisées pour le calcul ; (P=1).

Les données de température de l'air horaires mesurée sont utilisées pour calibrer et valider la simulation. Selon le document ASHRAE guideline 14 (ASHRAE Guideline 2002), le modèle de simulation est considéré calibré si:

- Les valeurs NMBE horaires sont à ± 10% et les valeurs CV (RMSE) horaires sont inférieures à 30%.
- Les valeurs NMBE mensuelles sont à ± 5% et les valeurs CV (RMSE) mensuelles sont inférieures à 15%.

Le NMBE et le CV (RMSE) ont été utilisés pour différentes comparaisons entre les données de température de l'air mesurées et simulées. Le modèle a été validé à l'aide du tableau 7.1 qui présente les résultats de calibration NMBE et CV (RMSE) entre valeurs horaires obtenus depuis la simulation et l'expérimentation dans la Chambre 1 pendant l'été et l'hiver.

Table 7. 1 Critères de calibration de validation du modèle de simulation. (Source, l'auteur).

Critères de validation	Température de l'air intérieur en été	Température intérieur en hiver
NMBE %	2.643	-3.026
CV (RMSE) %	4.139	8.622

La figure 7.1 représente la comparaison entre les températures intérieures mesurées et simulées dans la période surveillée.

CHAPITRE VII : EVALUATION DES STRATEGIES DE PERFORMANCE ENERGETIQUE

En été, le NMBE est de 2.643% et le CV (RMSE) de 4.139%, tandis que la limite admise est de $\pm 10\%$ et $\pm 30\%$ respectivement. En hiver le NMBE est de -3.026% et le CV (RMSE) est de 8.622%, tandis que la limite admise est respectivement de $\pm 10\%$ et $\pm 30\%$. Ces deux valeurs sont comprises dans la marge de valeurs horaires recommandées par l'ASHRAE guideline 14. Ce résultat montre que (voir Fig. 7.1) les données surveillées expérimentalement se concordent aux résultats de simulation et le modèle de simulation créée est considéré valide.

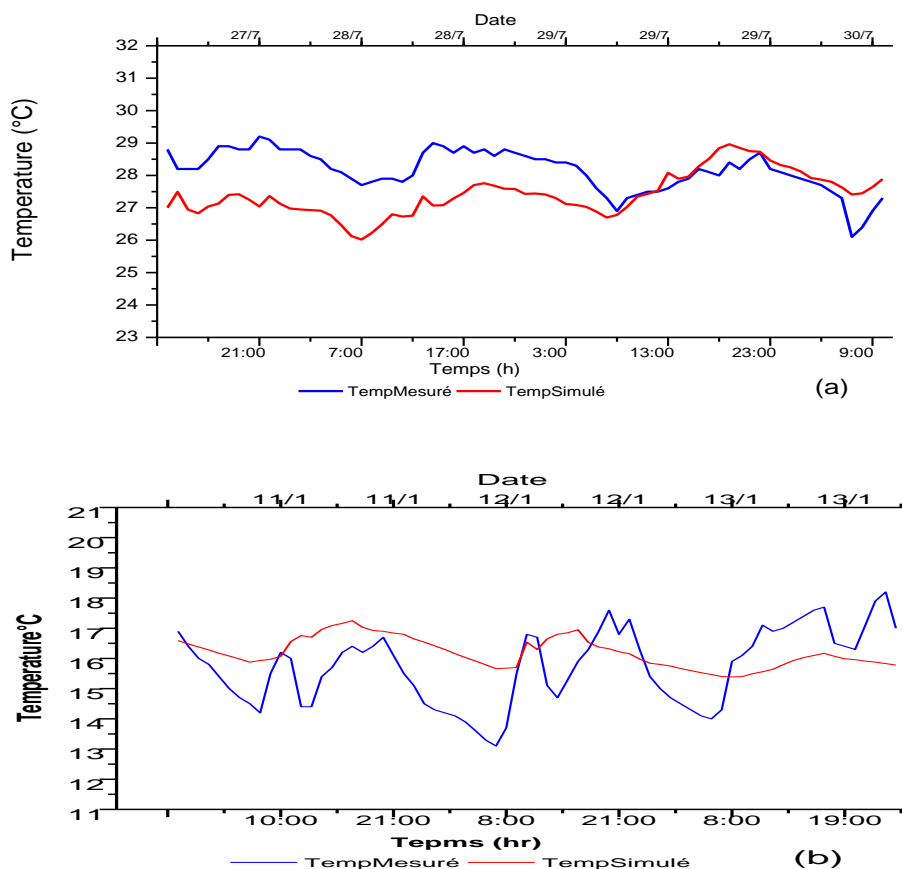


Figure 7. 1 Comparaison entre la température de l'air intérieur mesuré et simulé durant la période d'étude. (a) Juillet 27-30,2019 ;(b) Janvier 11-14,2019. (Source, l'auteur).

Au vu des résultats présentés, il est montré que le modèle élaboré est capable de prédire correctement les conditions thermiques intérieures et la consommation d'énergie en cas d'intégration de plusieurs stratégies de performance énergétique.

7.2 Comparaison entre l'expérimental et la simulation

Le premier cas du logement social a été modélisé et simulé par le logiciel de simulation thermique TRNSYS. La variation de température de l'air intérieur entre les mesures

CHAPITRE VII : EVALUATION DES STRATEGIES DE PERFORMANCE ENERGETIQUE

expérimentales et de simulations est étudiée par rapport à la zone du confort adaptatif utilisant les équations (2 et 4) du standard ASHRAI 55.

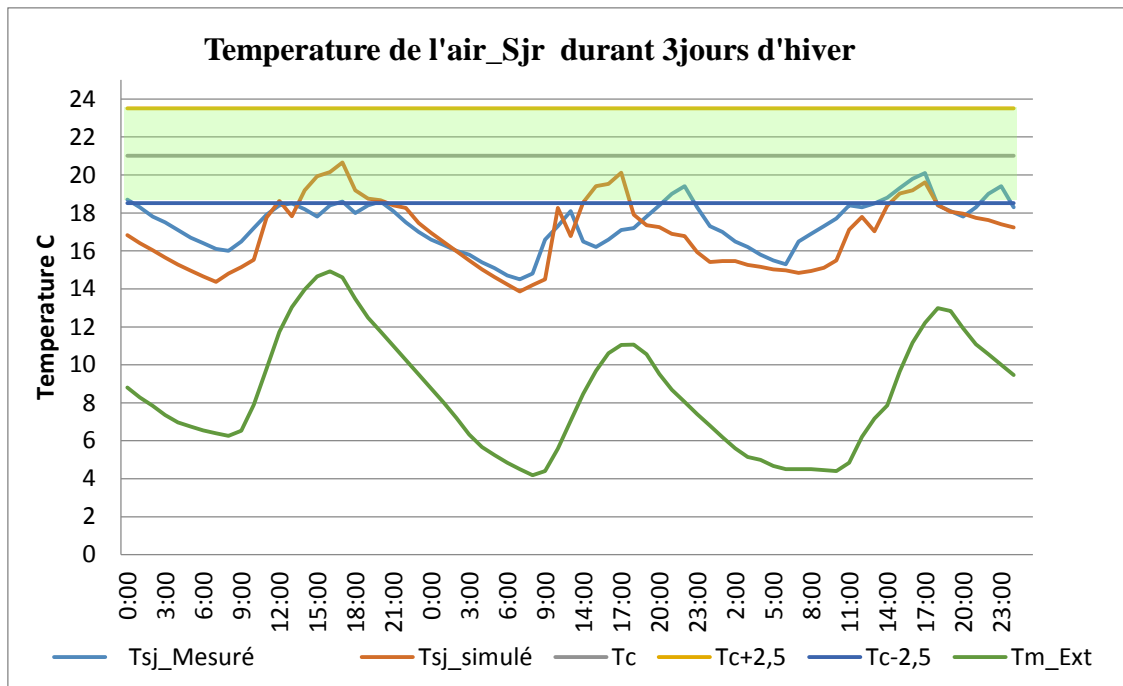


Figure 7. 2 L'évolution de la température et le confort thermique pour le Séjour en hiver. (Source, l'auteur).

La figure 7.2 montre l'évolution de la température de l'air du séjour durant l'hiver, les deux courbes de température expérimentale et simulée se coïncident, cependant la température simulée est légèrement plus élevée que l'expérimentale notamment durant l'après-midi.

Cela est à l'origine de quelques paramètres de simulation comme l'orientation et l'ensoleillement, en plus cet intervalle est inclus dans la marge d'incertitude 2°C de l'appareil de mesure « Enregistreur de données ».

CHAPITRE VII : EVALUATION DES STRATEGIES DE PERFORMANCE ENERGETIQUE

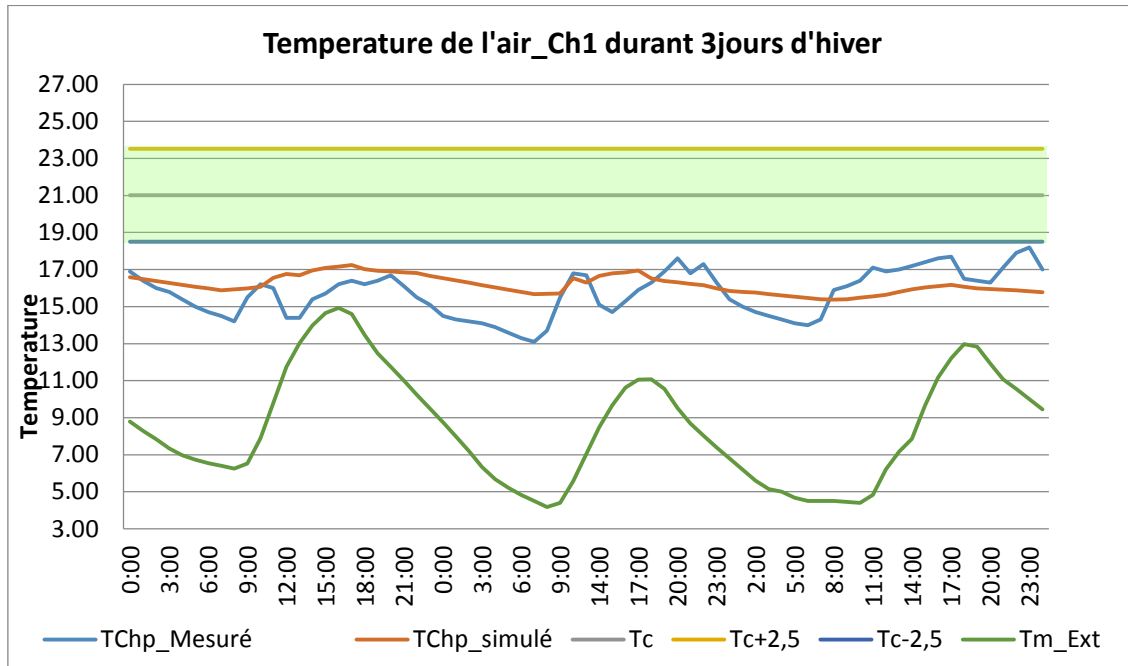


Figure 7. 3 L'évolution de la température et le confort thermique pour la Chambre 1 en hiver (Source, l'auteur)

Sur la figure 7.3, les courbes de température représentent des valeurs très proches dans la chambre 01, par fois la température des mesures expérimentales est plus élevée que celle de simulation, cependant pour la chambres 2 (la figure 7.4) les courbes se coïncident le plus.

Nous pouvons expliquer ces différences par le comportement des occupants.

Le modèle de simulation élaboré prédit des températures intérieures proches de la réalité, ces valeurs sont loin de la zone du confort adaptatif pour l'hiver.

CHAPITRE VII : EVALUATION DES STRATEGIES DE PERFORMANCE ENERGETIQUE

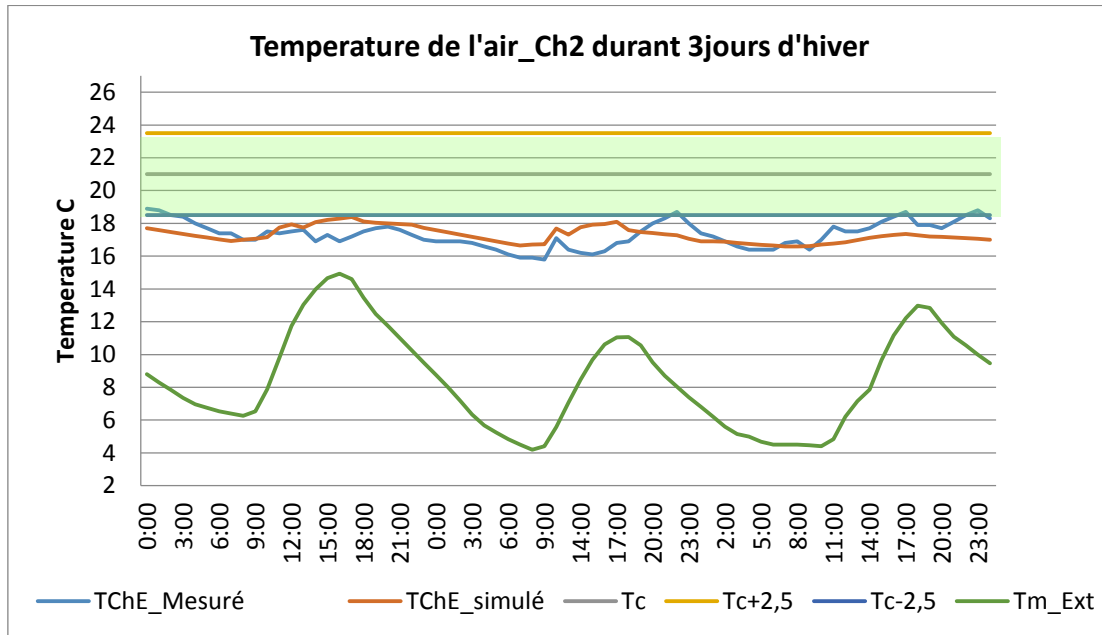


Figure 7.4 . L'évolution de la température et le confort thermique pour la Chambre 2 en hiver (Source, l'auteur)

Le résultat de simulation au niveau de la zone (Séjour) durant l'été est représenté sur la figure 7.5. Le maximum de l'écart entre la température simulée et mesurée est 2.86 °C enregistré à 18 h. Cela peut être expliqué par : de larges ouvertures sur le Nord-ouest, les charges internes ; puissance dissipée de quelques appareils (réfrigérateur, sèche à cheveux) et la présence des occupants.

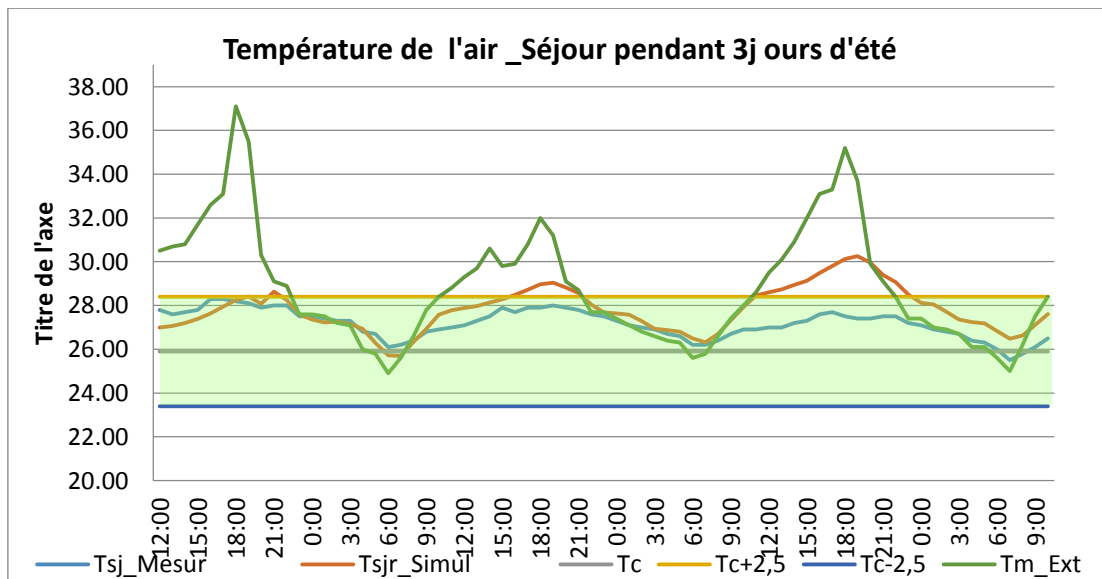


Figure 7.5 L'évolution de la température de l'air et le confort du Séjour en été (Source, l'auteur)

Les figures 7.6 et 7.7 décrivent l'évolution des températures dans les pièces Ch. 2 et Ch. 1 respectivement. Les deux courbes se rapprochent, cependant les valeurs de température

CHAPITRE VII : EVALUATION DES STRATEGIES DE PERFORMANCE ENERGETIQUE

mesurée sont plus élevées avec un pic de 29.2 °C enregistré entre 21 h dont l'écart est 1.8° C au niveau de la Chambre 1.

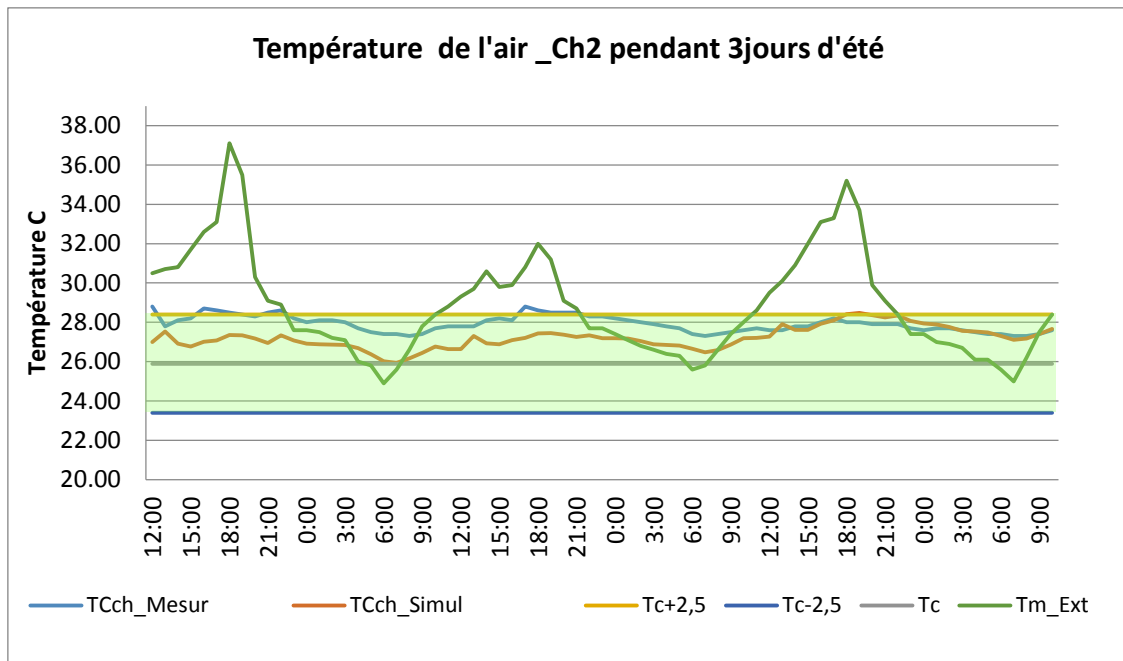


Figure 7. 6 L'évolution de la température de l'air et le confort thermique de la chambre 2 en été (Source l'auteur).

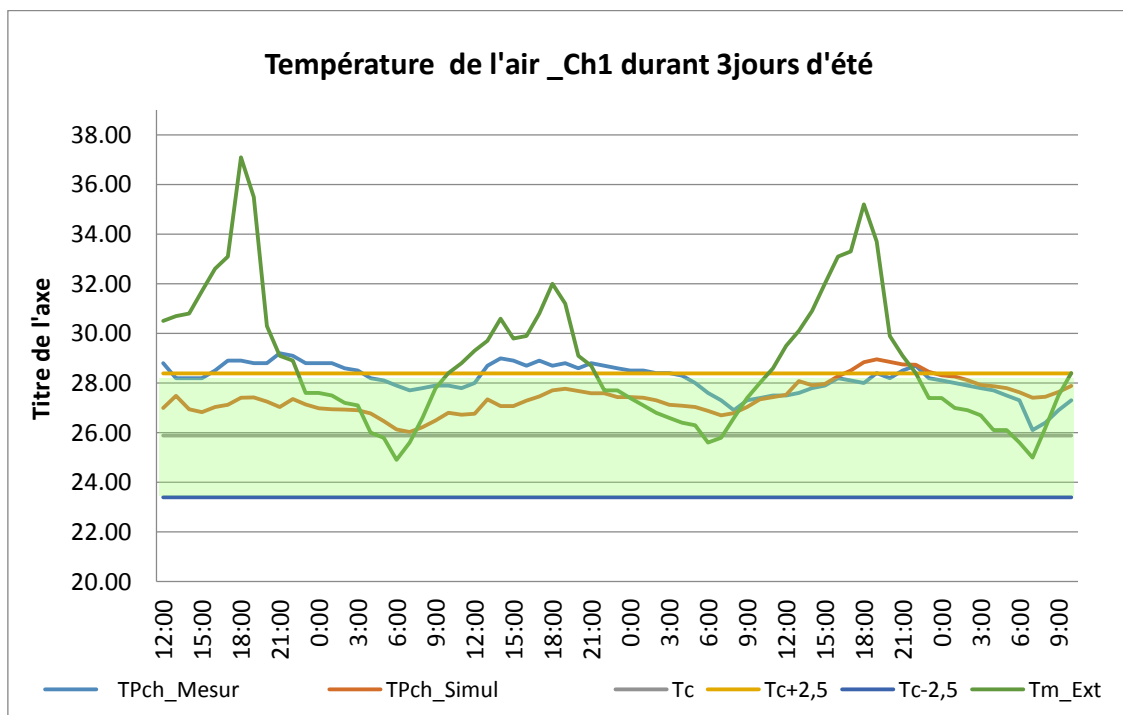


Figure 7. 7 L'évolution de la température de l'air et le confort thermique de la chambre 1 en été. (Source, l'auteur).

7.3 ETUDE de l'impact des stratégies passives

7.3.1 L'influence sur le confort thermique

Considérons les recommandations du chapitre précédent pour l'isolation d'enveloppe utilisant un isolant de fibres du bois sur les murs, planchers et toiture, ce travail considère 4 configurations différentes d'isolation thermique dont les variantes sont: la position de l'isolant (intérieur, intermédiaire et extérieur), le type de matériaux (fibre du bois, laine de bois et structure légère en bois), l'épaisseur de l'isolant qui n'excède pas 10 cm, voir la configuration d'isolation des murs sur la figure 7.8.

Pour chaque solution étudiée, la sélection de l'isolant tient compte des exigences :

- Écologique (faible énergie grise),
- Faible masse thermique,
- Faible valeur de conductivité thermique,
- Faible facteur de décrémentation,
- Afin d'éviter le risque de condensation dans la paroi, choisir un matériau d'un décalage temporel entre 10 à 18 heures, une masse d'accumulation thermique avec une densité élevée.

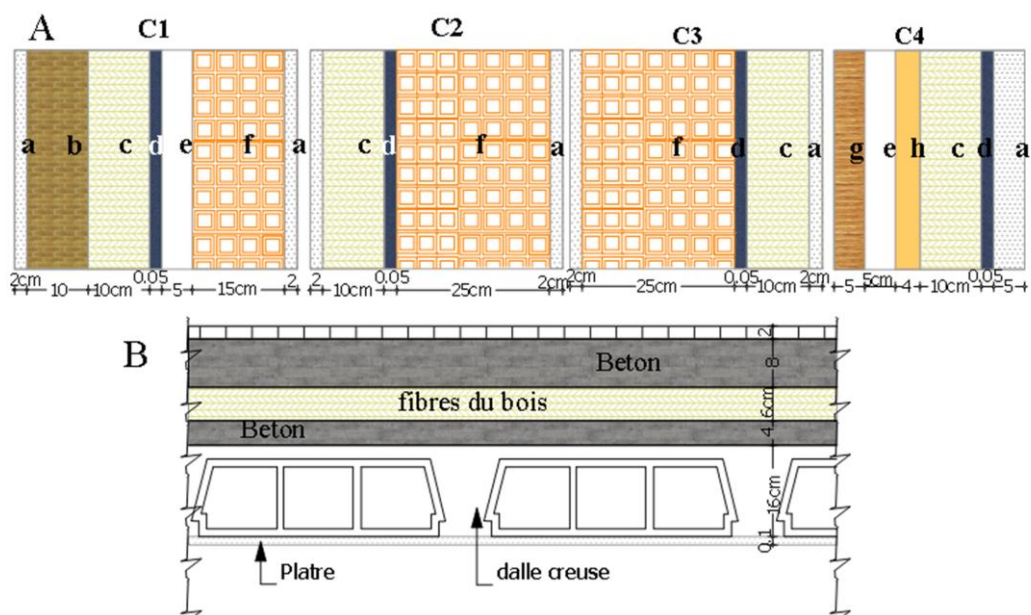


Figure 7. 8 La composition des différentes solutions étudiées du mur vertical. (Source, l'auteur).

□ La solution C1 (isolation centrale) : dans cette composition l'isolant fibre du bois est placé au centre de la paroi avec une lame d'air, la brique pleine couvre l'extrémité extérieur de la paroi et la brique creuse est placé à l'intérieur (fig. 7.8), en plus d'un

CHAPITRE VII : EVALUATION DES STRATEGIES DE PERFORMANCE ENERGETIQUE

système de frein vapeur qui prévient le transfert de vapeur d'eau et le risque de condensation au niveau de la paroi.

- Par contre dans la solution C2 l'isolant est placé sur le côté extérieur de la paroi.
- Dans la troisième composition C3 les composants sont les mêmes que la solution C2 la différence est l'emplacement intérieur de l'isolant.
- Le mur léger C4 se compose du bois à l'extérieur, une lame d'air et l'isolation (fibre du bois associé à la laine du bois), la maçonnerie intérieure est en plaque de plâtre.

Ces différentes maçonneries ont été prise en compte car elles sont les types de mur conventionnels les plus utilisés au Nord de la méditerranée, cependant le mur du bois a été étudié afin d'évaluer l'influence de l'isolant sur les structures légères dans la région d'étude. Les propriétés thermiques des couches proposées sont décrites dans le Tableau 7.2.

Table 7. 2 Propriété thermique des murs proposés pour l'étude. (Source, l'auteur).

Matériau	Épaisseur (cm)	Densité (kg/m ³)	Conductivité thermique λ (W/mK)	Chaleur spécifique (J/kg. K)	Résistance à la vapeur d'eau (μ)
Brique pleine	10	1850	1	1000	10
Lame d'air	2	1	0,130	1000	1
Laine de bois (panneaux)	2	140	0,042	1700	5
Fibre de bois (panneaux)	10	160	0,040	1470	3
FV: film de polyéthylène PE	0,05	850	0,200	1000	100000
Liège expansé	10	125	0,049	1560	1
Plaque de plâtre	5	825	0,250	1008	7
Bardage bois	3	540	0,140	2400	35

a) L'impact de l'isolant écologique

La figure 7.9 représente l'influence de chaque type d'isolation sur la température durant trois jours d'expérience les plus froids d'hiver.

L'isolation thermique des murs a un effet positif sur la température de l'air intérieure ; le résultat montre que la paroi de configuration C4 permet une température de 18.56 °C au moment des pics supérieurs au lieu de 16.76 °C du cas sans isolation avec une augmentation de 1.54 °C ; dans ce cas la limite inférieure du confort thermique adaptatif (Tc-2.5) pour 90% de satisfaction est atteinte.

CHAPITRE VII : EVALUATION DES STRATEGIES DE PERFORMANCE ENERGETIQUE

Pour le pic inférieur du soir, les deux types C4 et C1 présentent un résultat positif similaire notant que la paroi d'isolation C1 résiste plus au froid dont la température inférieure reste au-dessus de 17.39 °C par rapport à 15.75 °C en paroi de référence. En totalité le résultat sur les parois isolées (C1. C2. C3) se rapproche du résultat C4 et la différence de température s'étale entre [0 °C à 0.3 °C].

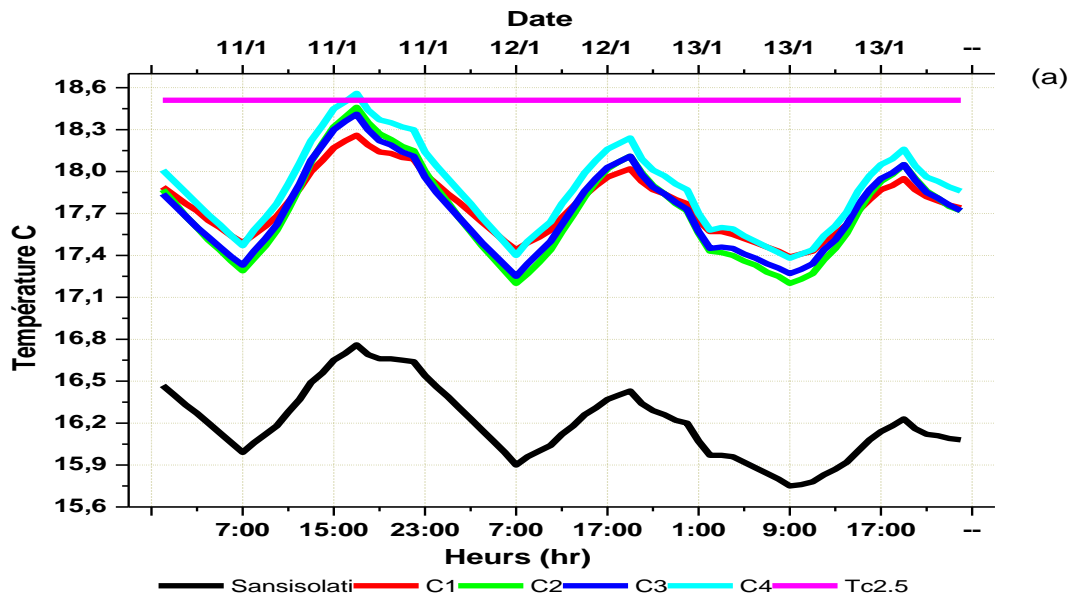


Figure 7. 9 L'influence des parois isolées sur la température de l'air intérieur en hiver. (Source, l'auteur).

En Été, la composition de la paroi isolée influence sur la température de l'air intérieur, la configuration C4 influence et augmente légèrement la température intérieure de +0.08 °C par rapport au cas sans isolation.

Le résultat représenté sur la figure 7.10 démontre que l'utilisation des parois C2.C3.C4 conduit à une ambiance thermique inconfortable durant 4 h sur un total de 71 h du temps d'expérience (Kadi, 2023).

Par contre, la paroi C1 maintient durant ce temps la température intérieure au-dessous de la limite supérieure 28.39 °C du confort adaptatif : Tc+2.5 pour 90% de satisfaction (Kadi, 2023).

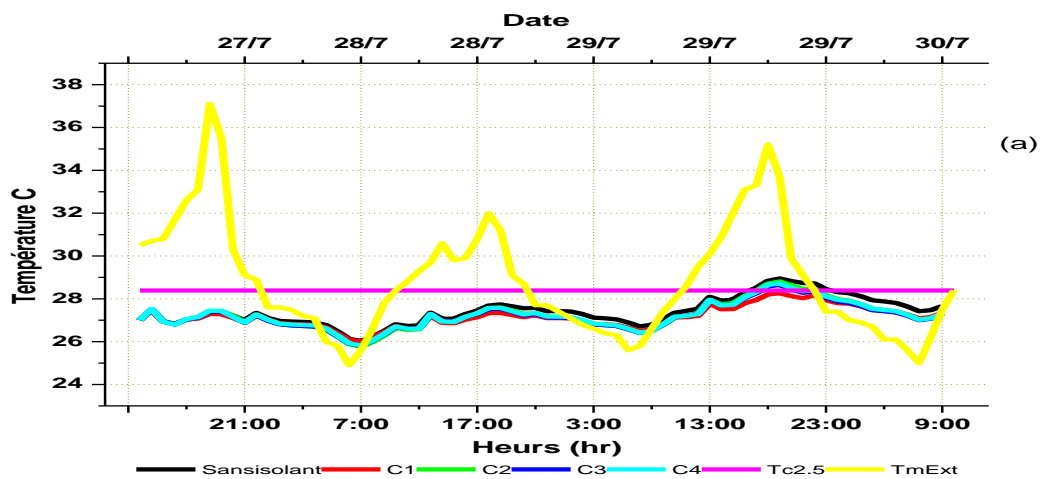


Figure 7. 10 La température de l'air intérieur en été avec les différents types d'isolation. (Source, l'auteur).

Durant les deux saisons, la différence de température entre l'isolation C4 et le cas sans isolation tente vers des valeurs supérieures lorsque la température s'élève par contre l'isolation C1 présente un comportement plus stable.

b) L'influence du type de vitrage :

L'étude sur le type du vitrage accompagné à l'isolation thermique démontre l'efficacité d'un double vitrage d'une valeur $U=0.86 \text{ w/m}^2.k$ et $g=0.598\%$, la figure 7.11 représente les valeurs de la température de l'air intérieur après l'optimisation du vitrage et l'isolation thermique.

Les configurations C4 à bois léger et la paroi C1 augmentent jusqu'à $4.36 \text{ }^\circ\text{C}$ lors des pics inférieurs du soir. Considérant l'une des parois isolées la température intérieure en hiver s'étale sur la zone du confort adaptatif entre la limite inférieure $T_c-2.5$ et la température opérative du confort $T_c=21.01 \text{ }^\circ\text{C}$. Sur 71 h du temps d'expérience la température intérieure reste entre $19.5 \text{ }^\circ\text{C}$ et $20.5 \text{ }^\circ\text{C}$ (Kadi, 2023).

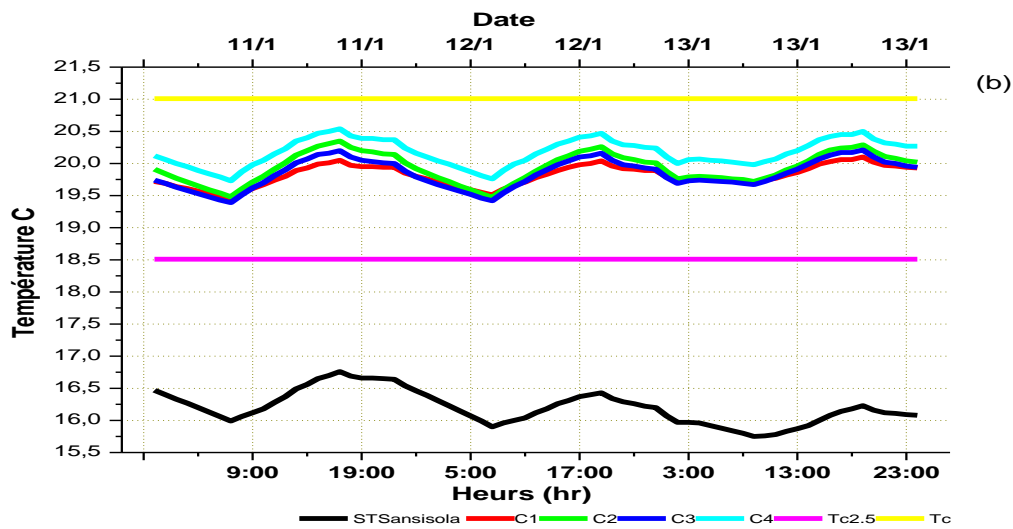


Figure 7. 11 L'influence du double vitrage et l'isolation thermique sur la température de l'air intérieur en hiver. (Source, l'auteur).

c) L'optimisation et amélioration en été

Dans cette phase une évaluation numérique est menée sur un ensemble de stratégies en vue d'améliorer la situation d'inconfort durant l'été par ; l'isolation d'enveloppe (planchers, toiture et parois), l'optimisation du vitrage, l'utilisation des protections solaires, ventilation naturelle nocturne (Kadi, 2023).

La figure 7.12 résume le résultat d'évaluation par rapport à la température du confort adaptatif, ces stratégies ont un effet positif sur la température intérieure avec les quatre types d'isolation ; L'utilisation de la paroi C1 réduit 1.19 °C du cas initial induisant à une température intérieure de 27.76 °C lorsque la température extérieure s'élève à 35.2 °C. Cette optimisation a amélioré l'ambiance thermique intérieure (Kadi, 2023) à savoir que la température ne dépasse pas la limite supérieure $T_c+2.5$ °C du confort adaptatif du standard ASHRAE_55.

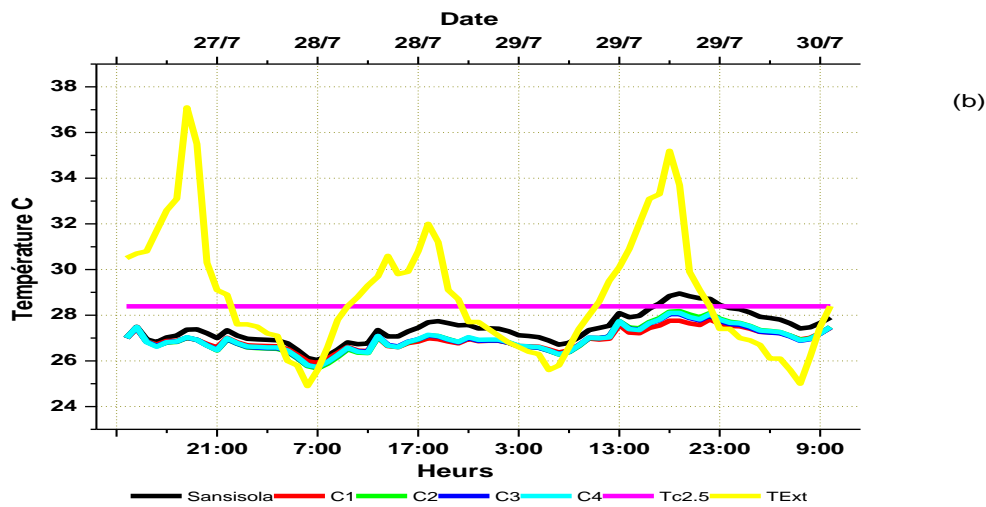


Figure 7. 12 L'influence de l'optimisation sur la température de l'air intérieur en été. (Source, l'auteur).

d) Le potentiel du confort thermique cumulé annuel

Afin d'étudier le potentiel du confort thermique de chaque stratégie d'optimisation, nous comparons le pourcentage du temps au cours de l'année pendant lequel la stratégie permet d'atteindre le confort.

La figure. 7.13 montre une comparaison entre le potentiel du confort cumulé annuel de chaque stratégie et les heures d'inconfort annuelles lorsque la température intérieure du bâtiment est supérieure à 27 °C en été et inférieure à 21 °C en hiver.

- En comparant l'isolation des murs ; la paroi C1 possède le potentiel du confort cumulé annuel le plus élevé **79,89 %** avec moins d'heures d'inconfort en été et en hiver dont leurs pourcentage est 7,92 %, 12,19% respectivement.
- Les dispositifs d'ombrage et le choix du vitrage représentent les stratégies les plus efficaces ; Le potentiel du premier dépasse **93%** par contre le choix du vitrage affecte de manière significative jusqu'à **83 %** la situation de confort.

CHAPITRE VII : EVALUATION DES STRATEGIES DE PERFORMANCE ENERGETIQUE

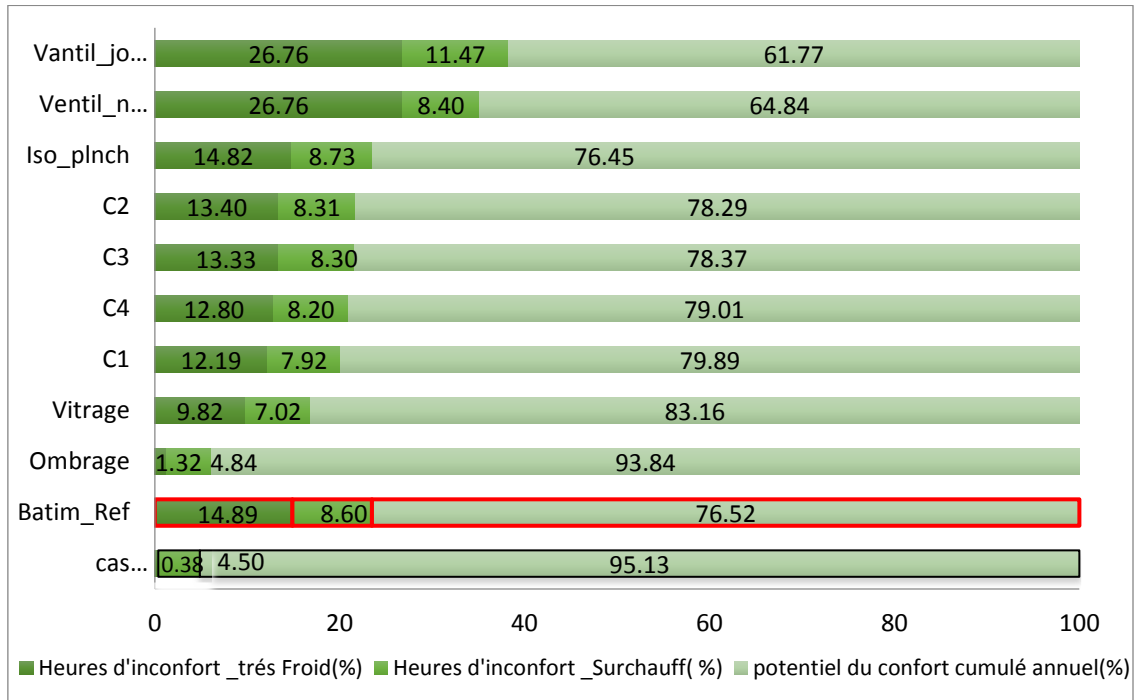


Figure 7. 13 Comparaison entre le potentiel du confort cumulé annuel et les heures d'inconfort annuelles. (Source, l'auteur).

-Le meilleur résultat a été obtenu pour le cas optimisé à travers lequel les stratégies plus efficaces sont combinées. Le cas optimisé concède plus que 95% du potentiel du confort cumulé annuel réduisant au moins 98% des heures d'inconfort liées au froid et 52 % des heures de surchauffe du bâtiment de référence.

7.3.2 L'impact des stratégies sur la performance énergétique

Afin d'explorer le potentiel de chaque mesure de conception sur la performance énergétique du bâtiment, des modifications ont été apportées sur le bâtiment. Les résultats de simulation du chauffage et refroidissement après l'intégration des stratégies aident à décider sur les mesures et paramètres plus efficaces.

a) L'isolation thermique

L'isolation thermique des murs extérieurs utilisant l'isolant fibre du bois permet de réduire la demande énergétique du chauffage et refroidissement ;

Les parois isolées C1, C2, C3 et C4 réduisent la consommation totale annuel du chauffage et refroidissement de 15 %, 11, 13 et 16 % respectivement (voir la figure 7.14) ; comparant les deux parois C1 et C4 La configuration C1 permet de réduire le refroidissement (Kadi, 2023), elle est efficace au moment de canicule d'été, par rapport à la paroi C4 qui est plus efficace à réduire le chauffage.

CHAPITRE VII : EVALUATION DES STRATEGIES DE PERFORMANCE ENERGETIQUE

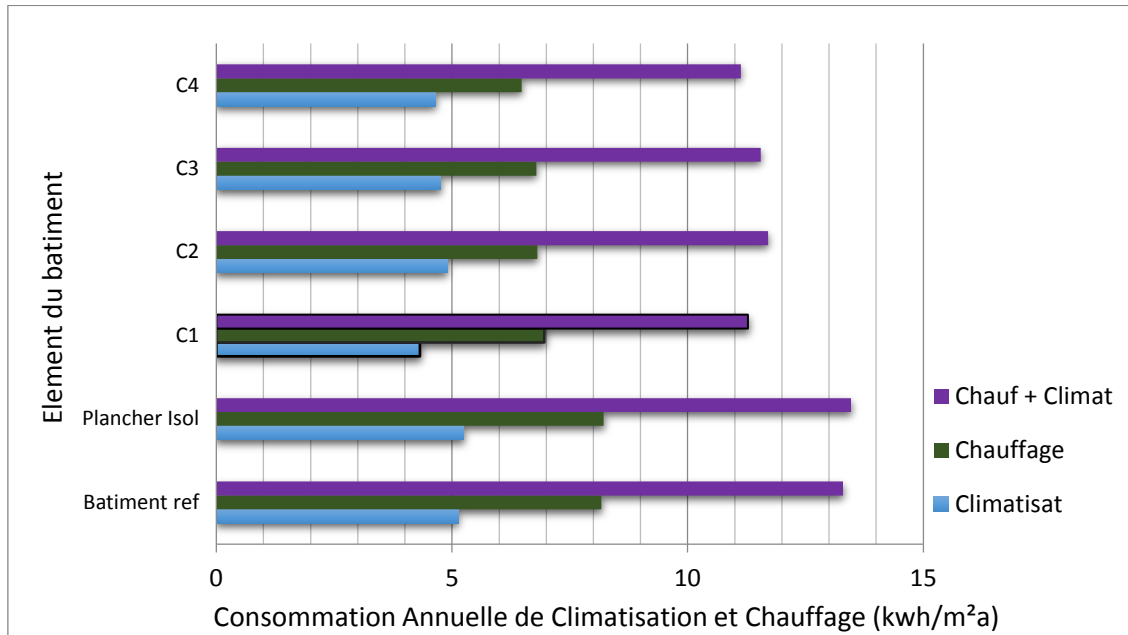


Figure 7. 14 Résultat sur les besoins énergétique du chauffage et climatisation après l'isolation thermique de l'enveloppe. (Source, l'auteur).

Par contre l'intégration de l'isolant à lui seul au niveau du plancher et plafond n'a aucun effet positif sur la consommation énergétique ; pour le cas de référence l'isolation de ces deux éléments augmente légèrement les besoins annuels d'énergie.

b) L'impact du vitrage et les dispositifs d'ombrage

L'impact des dispositifs d'ombrage est clairement visible sur la climatisation dont ils réduisent 61% de la consommation annuel par contre le double vitrage ($U=0,86$ w/m²k et $g=0,59$) optimise d'avantage la performance énergétique du bâtiment et réduit près de 57% la consommation énergétique annuelle (Kadi, 2023) voir sur la figure 7.15. Ce type de vitrage réduit 5,66 kWh/m²a des besoins énergétiques annuels en chauffage et 3.12 kWh/m²a la consommation de climatisation.

CHAPITRE VII : EVALUATION DES STRATEGIES DE PERFORMANCE ENERGETIQUE

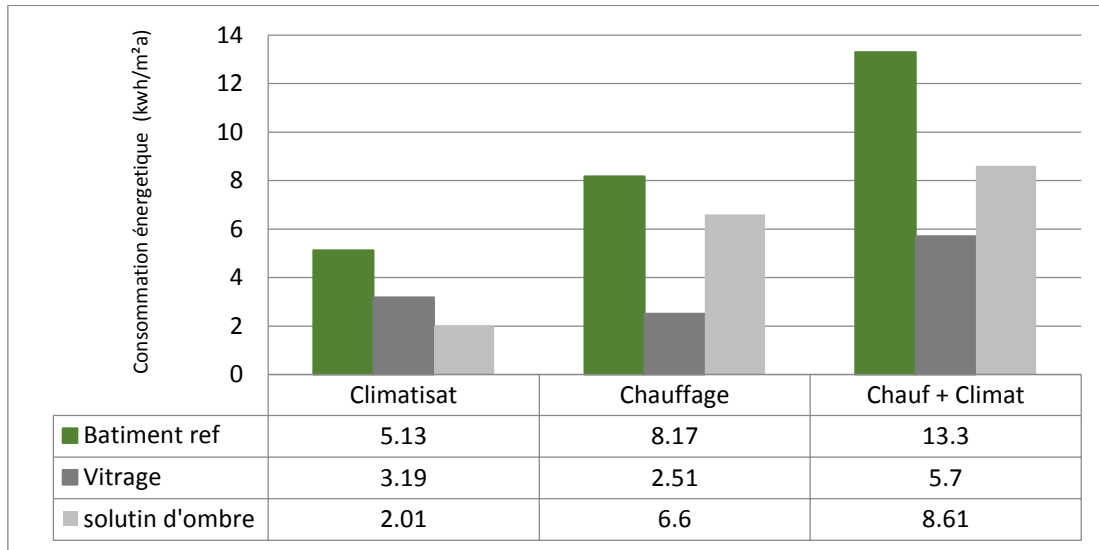


Figure 7. 15 . La consommation énergétique du bâtiment doté du double vitrage et dispositifs d'ombrage. (Source, l'auteur).

c) L'impact de la ventilation naturelle

L'augmentation du volume de l'air ventilé au moment de la journée a un effet négatif significatif sur la consommation du chauffage et du refroidissement voir la figure 7.16, seulement la ventilation naturelle nocturne est favorable aux économies d'énergie durant l'été dont elle réduit 6.5% de climatisation ce qui diminue le nombre d'heures de surchauffe en été.

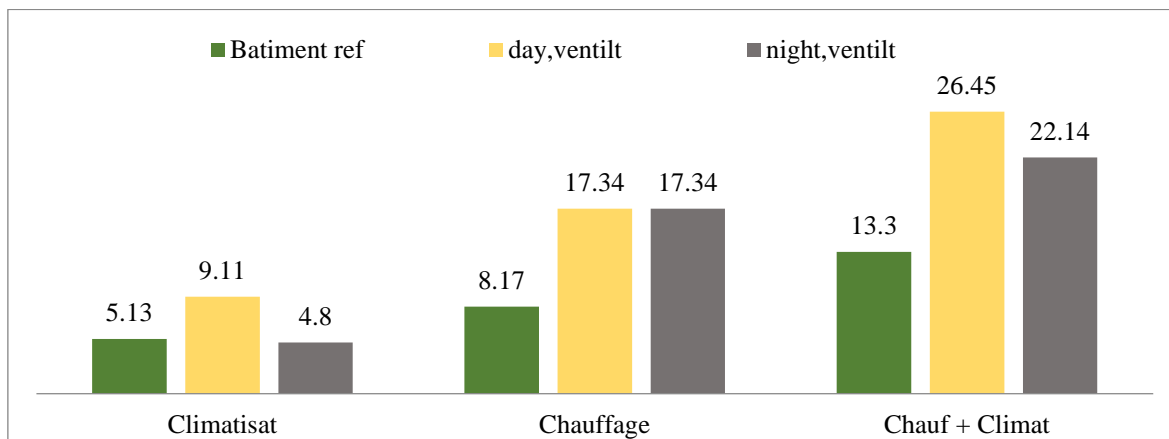


Figure 7. 16 Comparaison entre la consommation énergétique du bâtiment avec la ventilation naturelle et le scénario du bâtiment de référence.

7.3.3 Comparaison entre les stratégies passives :

Le graphe présenté sur la figure 7.17 permet de synthétiser les résultats obtenus après chaque modification de paramètre d'étude. Les stratégies jugées plus efficaces et à faible consommation du chauffage et climatisation sont intégrées pour optimiser la performance énergétique du bâtiment.

Certains mesures impactent visiblement la consommation énergétique annuel du bâtiment, plus précisément les propriétés de la paroi et l'isolation écologique des murs, les protections solaires, le type du vitrage et la ventilation naturelle nocturne en été. En comparaison, la demande du chauffage et climatisation utile est la plus faible dans le cas optimisé (2), ce résultat confirme la performance de cette version optimisé (Kadi, 2023).

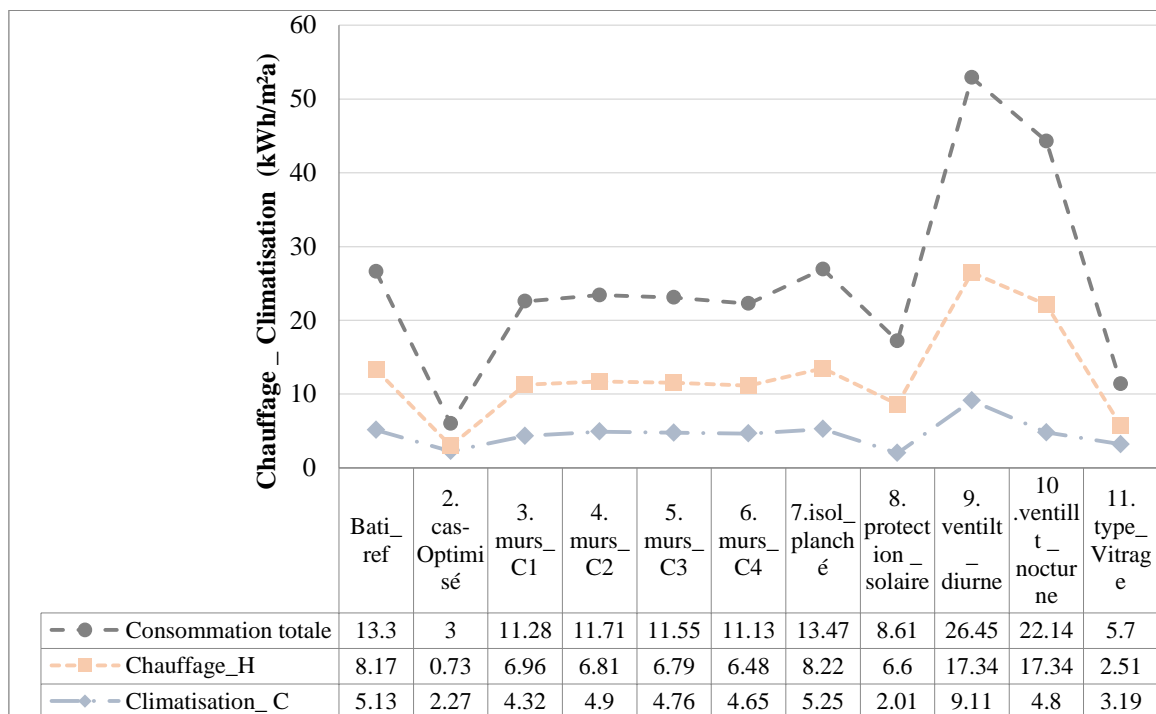


Figure 7. 17 Comparaison de la consommation énergétique entre tous les paramètres d'étude. (Source, l'auteur).

La comparaison des deux bâtiments (voir la figure 7.18) révèle que la demande de chauffage pour le bâtiment conventionnel s'élève jusqu'à 90% plus élevé par rapport au bâtiment optimisé avec un total annuel de la demande du chauffage de 8.1 kWh/a m² contre 0.73 kWh/a m² pour le cas optimisé.

La demande de refroidissement est plus élevée dans le cas conventionnel que le cas optimisé jusqu'à 55% avec un total de 5.13 kWh/a m² au lieu de 2.27 kWh/a m² dans le cas optimisé.

CHAPITRE VII : EVALUATION DES STRATEGIES DE PERFORMANCE ENERGETIQUE

Le résultat obtenu pour le bâtiment conventionnel montre que le chauffage domine pour ce bâtiment en ville de Bejaia en climat tempéré méditerranéen et les modifications apportées pour optimiser ce cas de référence peuvent réduire jusqu'à 91% du chauffage et 56% de climatisation.

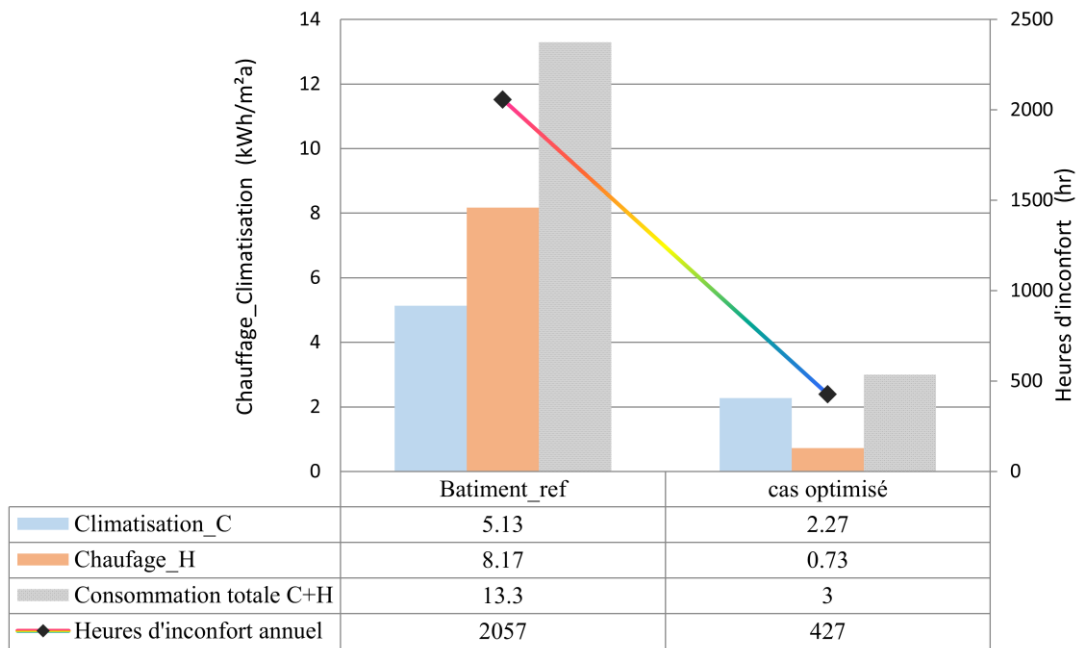


Figure 7. 18 Comparaison de la demande énergétique du bâtiment de référence et le cas optimisé. (Source, l'auteur).

CHAPITRE VII : EVALUATION DES STRATEGIES DE PERFORMANCE ENERGETIQUE

CONCLUSION :

Dans ce chapitre, une évaluation de la performance énergétique de plusieurs paramètres a été réalisée. Cette étape est cruciale pour ce travail de recherche, car elle informe la prise de décision quant à l'efficacité d'une stratégie, en tenant compte de son potentiel du confort thermique et de son faible bilan énergétique annuel.

Dans la première partie, le bâtiment conventionnel (de référence) a été modélisé sur le logiciel tout en créant un modèle proche à la réalité afin de prédire l'impact de chaque paramètre. Pour cela, il fallut valider le modèle numérique de simulation à l'aide de deux indices statistiques d'ASHRAE le NMBE et CVRMSE.

En se basant sur les recommandations des sections précédentes, l'objectif est d'étudier l'impact énergétique de chaque paroi spécifique équipée d'un isolant thermique écologique dans le contexte méditerranéen. Cela englobera également l'influence du type de vitrage, des protections solaires et de la ventilation naturelle.

Les résultats de l'évaluation indiquent que ces optimisations peuvent avoir un effet positif sur le confort thermique du bâtiment et l'amélioration de l'efficacité énergétique. Il est essentiel de se rappeler que l'augmentation de la densité thermique à l'extrémité de paroi et le renforcement de sa capacité thermique au centre avec un isolant fibre du bois a un effet positif que ce soit en été et en hiver. Cela induit à des plages de température intérieure confortables ne dépassant pas en été la limite supérieure $T_c+2.5$ °C du confort adaptatif du standard ASHRAE_55.

Les dispositifs d'ombrage et le choix d'un double vitrage avec ces caractéristiques $U=0,86$ W/m²k et $g=0,59$ représentent ainsi les stratégies les plus efficaces ; Le potentiel du premier dépasse 93% et ce vitrage affecte 83% la situation du confort. Les protections solaires réduisent 61% de la consommation énergétique annuelle par contre ce type de vitrage réduit près de 57%.

Le meilleur résultat a été obtenu pour le cas optimisé à travers lequel les stratégies plus efficaces sont combinées. Par rapport au bâtiment conventionnel, le cas optimisé a révélé une économie d'énergie d'environ 90% pour le chauffage et 55% pour le refroidissement. Il est possible de réduire le chauffage à 0.73 kWh/a m² et la climatisation à 2.27 kWh/a m².

Cette étude a confirmé que la consommation d'énergie peut être réduite visiblement par moyen de conception passive et d'isolants écologiques.

CONCLUSION GENERALE

CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS

En conclusion, cette thèse a exploré la performance énergétique et le confort thermique d'un bâtiment résidentiel en climat tempéré chaud méditerranéen, mettant en lumière des résultats significatifs et des avancées majeures dans la réduction du bilan énergétique annuel et l'impact Environnemental du bâtiment.

En outre cette étude a démontré l'effet des stratégies passives et l'isolation écologique sur le confort thermique du bâtiment et l'amélioration de l'efficacité énergétique.

Dans un premier temps, pour réduire la consommation énergétique du bâtiment et atteindre les conditions du confort thermique ; plusieurs techniques sont utilisées à savoir : les techniques d'architecture bioclimatique, des solutions permettant de réduire les besoins énergétiques et gérer les apports gratuits et les stratégies passives et actives.

Pour réduire les effets du changement climatique résultant de la forte consommation énergétique, des mesures et systèmes d'évaluation international ont été établis avec des exigences sur les performances énergétiques des bâtiments sous forme de labels et réglementations pour assurer à la fois l'efficacité énergétique, et diminuer l'impact du bâtiment sur l'environnement, puisque les bâtiments ont le plus d'opportunité à réduire les émissions de GES.

L'exploration du secteur résidentiel sur le plan énergétique et environnemental a révélé une défaillance au niveau des normes de l'efficacité énergétique du bâtiment. La réglementation thermique en vigueur n'impose pas de seuil pour la consommation énergétique, comme le cas du label et cela implique une augmentation de la consommation énergétique et des conséquences néfastes sur l'environnement.

En plus, l'analyse climatique de la ville de Bejaia a permis d'identifier les spécificités climatiques d'une région du littoral Algérien en milieu tempéré méditerranéen, ces recommandations sont nécessaires d'abord pour choisir la période de mesures in situ dans les bâtiments étudiés, puis de prévenir les stratégies qui affectent le plus le confort thermique. Nous constatons que, Bejaia se caractérise par des hivers pluvieux et doux et des étés chauds et secs avec un air chargé d'humidité, avec deux périodes défavorables ; les mois de Juillet et Août en été et les mois de Décembre, Janvier en hiver.

L'approche bioclimatique, ressort que le confort de la zone d'étude dépend majoritairement des stratégies passives liés aux : Chauffage solaire passif dont l'orientation, l'implantation, la conception architecturale, le type des parois opaques, le type du vitrage, la toiture avec une ventilation naturelle efficace à l'intérieur du bâtiment en été. Pendant les mois froids, il est recommandé l'utilisation du chauffage passif avec une orientation adaptée pour le captage solaire et des façades équipées d'ouvertures

CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS

appropriées, à l'exception du mois le plus froid où un chauffage d'appoint nocturne est nécessaire. Pour le confort estival, il est à privilégier une circulation d'air permanente, un espacement généreux entre les bâtiments et des protections contre le vent. À l'intérieur, il est recommandé encourager les techniques de ventilation naturelle, soutenues par des systèmes mécaniques si nécessaire. En cas de chaleur extrême, la climatisation est indispensable, tout en minimisant les gains de chaleur internes et solaires grâce à des dispositifs de protection solaire efficaces.

Pour étudier le confort thermique et la consommation énergétique, nous avons examiné deux types de bâtiments résidentiels : un logement social, représentatif du modèle répandu sur l'ensemble du territoire, et une résidence promotionnelle dotée d'une isolation thermique renforcée et d'une enveloppe étanche. Dans une première phase, la perception du confort thermique dans ces bâtiments à ventilation naturelle a été évaluée en utilisant le modèle adaptatif du Standard ASHRAE 55. Cette évaluation s'est basée sur les mesures in situ des paramètres d'ambiance tels que la température de l'air ambiant, l'humidité relative, la température moyenne radiante des parois et la vitesse de l'air intérieur.

En parallèle des mesures in situ, une seconde étude, menée à travers une enquête en porte à porte, a été entreprise pour évaluer la perception du confort thermique des résidents en fonction des caractéristiques du bâtiment, couvrant ainsi 13 logements. Cette enquête visait également à explorer les stratégies de chauffage et de rafraîchissement déjà en place, ainsi que la consommation énergétique du bâtiment. Les résultats de cette enquête indiquent que la sensation d'inconfort est perçue en hiver, et le confort thermique est plus fréquemment remis en question pendant cette période que durant l'été, l'enquête révèle également sur les espaces plus défavorables durant les deux saisons, cela a permis d'identifier les appartements à instrumenter afin d'étudier les paramètres d'ambiance.

L'analyse de la performance thermique révèle une disparité entre les deux bâtiments (le cas conventionnel et le cas isolé). Dans le bâtiment isolé, le confort thermique a été atteint dans toutes les pièces sans chauffage. En revanche, dans le bâtiment non isolé (social), le confort thermique n'est pas atteint, la température étant inférieure à la limite inférieure définie par le standard.

Ce constat a démontré que les caractéristiques du bâtiment isolé, telles que l'isolation des parois, le double vitrage et l'étanchéité à l'air, ont amélioré le confort thermique du bâtiment.

Cependant, l'analyse de la consommation énergétique des deux cas d'étude révèle que le bâtiment isolé consomme plus d'énergie par rapport au logement sociale. Cette

CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS

consommation énergétique élevée de la résidence isolée peut être liée à des lacunes au niveau de plusieurs paramètres notamment la pratique des occupants. De plus d'autres facteurs influencent : les caractéristiques physico-thermiques de la paroi, l'isolant, les caractéristiques du vitrage, la performance de l'enveloppe, le système du chauffage, le système de production d'eau chaude sanitaire, une installation de production d'énergie renouvelable.

L'analyse des projets pilotes portant sur des bâtiments à consommation énergétique quasi nulle (NZEB), mis en œuvre à l'échelle mondiale, notamment en région méditerranéenne, au cours des cinquante dernières années, a permis de déterminer les stratégies les plus adoptées pour optimiser l'efficacité énergétique. Ces stratégies sont l'isolation thermique des murs, planchers et l'efficacité des fenêtres, le système VRC ventilation mécanique à récupération de chaleur et pour l'approvisionnement en énergie renouvelable l'utilisation de capteurs solaires thermiques, de panneaux photovoltaïques et les réservoirs d'eau chaude.

Dans la situation des bâtiments Passivhaus, l'accent est mis sur l'efficacité énergétique, en veillant à garantir une qualité d'air et un environnement intérieur favorables. Ceci est réalisé grâce à un ajustement approprié des systèmes CVC (chauffage, ventilation et climatisation), à l'optimisation des échangeurs de chaleur, à l'installation de systèmes de récupération de chaleur qui réduit la concentration de dioxyde de carbone et fourni de manière adéquate l'air frais et la mise en place de dispositifs de protection solaire.

Le choix de matériaux isolants efficaces et écologiques constitue une approche essentielle pour minimiser l'impact sur l'environnement. Leur intégration dès la phase initiale de conception est cruciale afin de réduire la consommation énergétique sur l'ensemble du cycle de vie. Les isolants issus de déchets de cuir et de menuiserie et les matériaux traditionnels naturels comme la fibre du bois et le sable sec sont efficaces en méditerranée.

Dans notre cas d'étude, le choix du matériau isolant prendra en considération divers facteurs thermo-physiques, tels qu'une faible masse thermique, une faible valeur de conductivité thermique, un faible facteur de décrépitation, un décalage temporel compris entre 10 et 18 heures, ainsi qu'une masse d'accumulation thermique présentant une densité élevée.

Les films de contrôle solaire (SCF) diminuent la consommation d'énergie liée à la climatisation, mais entraînent une augmentation de la consommation liées au chauffage et l'éclairage. En revanche, un vitrage à faible émissivité (Low-E) réduit de manière plus

CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS

efficace la perte d'énergie due au chauffage par rapport à un vitrage de type thermochromique. Les propriétés thermiques et optiques du vitrage après l'application d'un SCF dépendent du film utilisé et de l'orientation de la fenêtre. Un coefficient de gain de chaleur (SHGC) plus bas reflète davantage les rayons, tandis qu'une valeur U élevée implique davantage de déperditions thermiques en hiver.

Par conséquent, parmi les paramètres testés, l'utilisation d'un double vitrage présentant des propriétés thermiques telles que $\tau_{vis}=63\%$ et $g=0.59$, conjugué à une conductivité thermique du vitrage $U=0.86 \text{ W/m}^2\text{k}$, influence favorablement le niveau de confort de l'environnement jusqu'à 83% et entraîne une réduction de 69% de la consommation énergétique du chauffage et 61% de climatisation.

L'évaluation de la performance énergétique des stratégies proposées repose sur des simulations numériques effectuées à l'aide du logiciel Trnsys. Le bâtiment conventionnel (social) a été modélisé sur le logiciel tout en créant un modèle proche à la réalité afin de prédire l'impact de chaque paramètre étudié. Pour ce faire, la validation du modèle numérique de simulation a été réalisée en se basant sur deux indices statistiques d'ASHRAE, le NMBE et le CVRMSE. Les données horaires mesurées de la température de l'air ont été utilisées pour calibrer et valider la simulation.

Les investigations réalisées ont permis de déterminer les stratégies de conception passive les plus efficaces du point de vue énergétique et thermique. Ces stratégies ont été soumises à la simulation d'un modèle de bâtiment optimisé (cas optimisé).

Le travail de simulation consistait à simuler la consommation énergétique après l'adoption de chaque stratégie, à savoir : quatre types différents de parois isolées, le vitrage Low-E, les protections solaires, et étudier l'impact de la ventilation naturelle.

Les résultats des simulations indiquent que la configuration des parois isolées avec des fibres de bois a un impact positif tant en été qu'en hiver, conduisant à des plages de température intérieure confortables. Les dispositifs d'ombrage et le choix du vitrage se révèlent être les stratégies les plus efficaces : les protections solaires réduisent la consommation énergétique annuelle de 61 %, tandis que le type de vitrage contribue à une réduction d'environ 57 %.

Les résultats mettent en évidence que le bâtiment optimisé permet une économie d'énergie d'environ 90 % pour le chauffage et 55 % pour le refroidissement. De plus, il est possible de réduire la consommation énergétique annuelle à $3 \text{ kWh/m}^2\text{a}$, ce qui représente une diminution de 77 % par rapport au cas conventionnel. La consommation du chauffage peut être réduite à $0,73 \text{ kWh/m}^2\text{a}$, et celle du refroidissement à $2,27 \text{ kWh/m}^2\text{a}$. Cette étude

CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS

illustre clairement l'impact de ces optimisations sur le confort thermique du bâtiment et l'amélioration de son efficacité énergétique.

Le modèle d'optimisation du confort thermique et de la consommation énergétique proposé offre une assistance à la prise de décision sur la conception architecturale et les différents éléments du bâtiment à construire dans un climat tempéré chaud méditerranéen. Il permet de définir les solutions optimales pour améliorer l'efficacité énergétique et le confort des bâtiments résidentiels, favorisant ainsi le développement de constructions écologiques.

Suite aux résultats obtenus, grâce à cette approche d'optimisation détaillée, il est possible de concevoir un bâtiment passif selon la norme Passivhaus caractérisé par une très faible demande énergétique tout au long de l'année.

Cela ouvre la voie au développement d'un label d'efficacité énergétique en Algérie, destiné à évaluer la performance énergétique et la durabilité des bâtiments, tout en contribuant à s'engager dans la transition énergétique.

RECOMMANDATIONS

En vue d'optimiser la performance énergétique des bâtiments dans un contexte méditerranéen tempéré, les recommandations suivantes sont proposées pour guider les futurs développements et améliorations :

- Optimiser les isolants thermiques : l'utilisation de la fibre du bois comme matériaux d'isolation thermique écologiques à faible énergie grise, à faible impact sur l'environnement.
- Choisir le matériau isolant sur la base des facteurs : faible masse thermique, faible valeur de conductivité thermique, faible facteur de décrémentation, décalage temporel entre 10 à 18 heures, une masse d'accumulation thermique avec une densité élevée.
- Réduire le risque de condensation dans les parois, en installant l'isolant en fibre de bois au niveau intermédiaire, suivi d'un pare-vapeur et d'une lame d'air au centre. La brique pleine devrait recouvrir l'extrémité extérieure de la paroi, tandis que la brique creuse doit être positionnée à l'intérieur.
- Limiter les gains solaires en été et promouvoir l'éclairage naturel en utilisant un vitrage à faible émissivité sélective Low-E.
- Prévoir un double vitrage doté d'un film à control solaire SCF Low-E spectralement sélectif à $\tau_{vis}=63\%$ et $g=0.59$, conjugué à une conductivité thermique du vitrage $U=0.86 \text{ W/m}^2\text{k}$.

CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS

- Conception Bioclimatique : Encourager la conception bioclimatique des bâtiments pour tirer parti des conditions climatiques locales, en intégrant des éléments tels que la ventilation naturelle et la protection solaire.
- Intégrer un système de ventilation double conduit desservant une unité centrale qui assure la récupération de chaleur du chauffage et du refroidissement, elle permet de contrôler le débit de ventilation, de récupérer les pertes thermiques de ventilation et éliminer la concentration de polluants à l'intérieure du bâtiment.
- Sur la conception et Architecture Concevoir les espaces et façades adaptées aux conditions climatiques locales par moyens architectoniques, notamment les protections solaire ; les auvents, les brise-soleil et les volets.
- Sur le plan Urbanisme : Promouvoir les espaces verts et favoriser l'intégration d'espaces verts et de jardins dans la conception des bâtiments résidentiels pour améliorer la qualité de l'air, favoriser la biodiversité urbaine et offrir des espaces de détente et de loisirs aux résidents
- L'innovation Technologique : Améliorer d'avantage la performance énergétique du bâtiment avec l'installation de nouvelles technologies émergentes de systèmes actifs tels que les systèmes CVC alternatifs avec pompes à chaleur géothermiques (GSHP) ou pompes à chaleur intégrées.
- Réglementations énergétique : la mise à jour de la réglementation thermique en vigueur favorisant les normes énergétiques élevée pour les nouvelles constructions.
- Sensibilisation et formation : Sensibiliser les propriétaires et les constructeurs afin de promouvoir les avantages des pratiques de construction éco-énergétique.
- L'éducation des occupants des bâtiments résidentiels sur l'efficacité énergétique.
- Intégration de Technologies Renouvelables : Adopter des technologies d'énergie renouvelable, telles que les panneaux solaires photovoltaïques, pour exploiter efficacement l'énergie solaire disponible dans la région.

CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS

AXES DE RECHERCHES FUTURES

Le champ de recherche de cette étude se restreint à l'impact de diverses stratégies passives sur le confort thermique et l'efficacité énergétique, mettant en avant l'utilisation de matériaux d'isolation écologiques tels que la fibre de bois, des dispositifs d'ombrage, et les types spécifiques des vitrages. L'objectif est d'analyser comment une conception appropriée peut influencer l'environnement intérieur, ainsi que l'efficacité énergétique des bâtiments résidentiels.

De ce fait, plusieurs axes de recherche nécessitent une exploration plus approfondie ont émergé de cette étude.

- L'impact des isolants innovants intégrés au processus de conception d'un bâtiment à énergie quasi nulle (NZEB) en termes d'efficacité énergétique et d'économie d'énergie pour le développement énergétique durable au sein des bâtiments résidentiels en Algérie.
- La qualité de l'air du bâtiment résidentiel et l'impact d'une ventilation mécanique à double conduit.
- Déterminer la conception optimale NZEB dotée de solutions actives pour le climat tempéré chaud méditerranéen.
- Evaluer dans la pratique l'impact d'un système de ventilation, chauffage, climatisation et eau chaude intégré au bâtiment qui contient :
 - un système CVC alternatif avec pompe à chaleur intégrées ou pompes à chaleur géothermiques,
 - Un échangeur de chaleur terre-eau, Une ventilation double conduit desservant une unité centrale qui assure la récupération de chaleur dès l'approche de conception,
 - Une unité de récupération de chaleur thermodynamique dans le système VMC et une pompe à chaleur (PAC) qui peuvent être efficace,
 - L'utilisation de conduites d'air géothermiques de tuyauterie en zinc qui peut réduire le coût énergétique du refroidissement au nord Algérien.
- L'impact de panneaux photovoltaïques sur le rendement énergétique d'un bâtiment.

BIBLIOGRAPHIE

BIBLIOGRAPHIE

- Abouda, M. (1985). Axxam: Maisons Kabyles. *Publ. d'Art.*
<https://books.google.dz/books?id=NrAOAQAAMAAJ>.
- Aburas, M, Veronica S, Terence W, Runqi L, Heike, and Yupeng Wu. (2019). Thermo-chromic Smart Window Technologies for Building Application: A Review. *Applied Energy*, 255 (December): 113522. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.113522>.
- Ademe-Puca-Cstb. (2007). Comparaison internationale batiment et energie.
- Afolabi A. Dania, Graeme D. Larsen, and Yunming Yao. (2013). Mainstreaming Sustainable Construction: Case Studies Of An Indigenous And Multinational Firm In Nigeria. Working Paper Proceedings, *Engineering Project Organization Conference Devil's Thumb Ranch*, Colorado, July.
- Albatayneh, Aiman, Dariusz A, Adrian P, and Behdad M. (2016). Assessment of the Thermal Performance of Complete Buildings Using Adaptive Thermal Comfort. *Procedia - Social and Behavioral Sciences, Urban Planning and Architectural Design for Sustainable Development (UPADSD)*, 216 (January): 655–61. <https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2015.12.051>.
- Allard F. (2002). Natural ventilation in buildings: a design handbook. *2nd edition James & James Ltd.*
- Alkama Dj & Zerouala M. (1997). Conflits conceptuels et situation de l'habitat en Algérie. 1er séminaire national en architecture, université Mohamed Khider, Biskra.
- Ali-Toudert F, and Juliane Weidhaus. (2017). Numerical Assessment and Optimization of a Low-Energy Residential Building for Mediterranean and Saharan Climates Using a Pilot Project in Algeria. *Renewable Energy*, 101: 327e346.
- André P, Claude E. Delisle, Jean-Pierre Revéret. n.d. (2003). L'évaluation Des Impacts Sur l'environnement: Processus, Acteurs et Pratique Pour Un Développement Durable. *Illustrée. Presses inter Polytechnique*.
- Antonio P , Concettina Marino, Antonino Nucara, and Matilde Pietrafesa. (2018). Energy Performance of an Electrochromic Switchable Glazing: Experimental and Computational Assessments. *Energy and Buildings*, 165 (April): 390–98. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.12.049>.
- APRUE. (2005). Maitrise d'énergie. Ses principaux acteurs et instruments. La Lettre de l'Aprue, *Bulletin trimestriel* n° 08 Mai 2005, APRUE, Alger, 11p. Web page: Lien.
- APRUE. (2007). Consommation énergétique finale de l'Algérie ;Chiffres clés année 2005. La lettre, *bulletin trimestriel* de l'Aprue N°14/Avril 2009. Web page: www.aprue.org.dz.
- APRUE. (2008). La Lettre *Bulletin Trimestriel* de l'APRUE - N°13.
- APRUE. (2017). Consommation Energétique Finale de l'Algérie, Chiffres Clés : Année 2015 ;Edition 2017.
- Appu H, and Pertti V. (2008). A Critical Review of Building Environmental Assessment Tools. *Environmental Impact Assessment Review*, no. 28: 469–482.
- Arbaoui F.(1989), De l'exode rural à l'intégration urbaine-cas de Constantine, Algérie. thèse de doctorat de IIIème cycle en urbanisme, université de droit, d'économie et de science d'Aix Marseille, institut d'aménagement régional (IAR).
- Ascione, Fabrizio, Martina Borrelli, Rosa Francesca De Masi, Filippo de Rossi, and Giuseppe Peter Vanoli. (2019). A Framework for NZEB Design in Mediterranean Climate: Design, Building and Set-up Monitoring of a Lab-Small Villa. *Solar Energy*, 184 (May): 11–29. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2019.03.083>.
- Ascione, Fabrizio, Martina B, Rosa Francesca D, and Giuseppe Pl. (2020). Nearly Zero Energy Target and Indoor Comfort in Mediterranean Climate: Discussion Based on Monitoring Data for a Real Case Study. *Sustainable Cities and Society*, 61 (October): 102349. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2020.102349>.

BIBLIOGRAPHIE

- Ascione, Fabrizio, Martina B, Rosa Francesca D, and Giuseppe Pe. (2020). Hourly Operational Assessment of HVAC Systems in Mediterranean Nearly Zero-Energy Buildings: Experimental Evaluation of the Potential of Ground Cooling of Ventilation Air. *Renewable Energy*, 155 (August): 950–68. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2020.03.180>.
- Ascione, Fabrizio, Rosa Francesca D, Filippo d, Silvia Ruggiero, and Giuseppe P. (2016). Optimization of Building Envelope Design for NZEBs in Mediterranean Climate: Performance Analysis of Residential Case Study. *Applied Energy*, 183 (December): 938–57. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.09.027>.
- ASHRAE, ANSI. (2017). ANSI/ASHRAE Standard 55-2017, Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy. *ASHRAE*, Atlanta USA.
- ASHRAE Guideline. (2002). ASHRAE Guideline. 14-2002, Measurement of Energy and Demand Savings. *American Society of Heating, Ventilating, and Air Conditioning Engineers*, Atlanta, Georgia.
- Architecture et Climat. (2021). *Vitrage isolant thermique et vitrage isolant acoustique*. [En ligne] Disponible à l'adresse : URL : <https://energieplus-lesite.be/> (consulté le 10/12/2023).
- Atlanta: American Society of Heating, Refrigerating and Air- Conditioning Engineers. (2004). ASHRAE Standard 55. *Thermal environmental conditions for human occupancy*, issued 2004.
- Aubouin J., Debelmas, J. (1980). L'Europe : les chaînes périméditerranéennes. Colloque C 5. 26eCGI, pp. 62–85.
- Australian Government. (2008). Your Home Technical Manual, 4th ed., Department of the Environment, Water, Heritage and the Arts, Commonwealth of Australia. Canberra ACT.
- Agugliaro M, Francisco G. Montoya, Andrés Sabio-Ortega, and Amós García-Cruz. (2015). Review of Bioclimatic Architecture Strategies for Achieving Thermal Comfort. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 49 (September): 736–55. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.04.095>.
- Badeche M, and Bouchahm Y. (2020). Design Optimization Criteria for Windows Providing Low Energy Demand in Office Buildings in Algeria. *Environmental and Sustainability Indicators*, 6 (June): 100024. <https://doi.org/10.1016/j.indic.2020.100024>.
- Balasbaneh AT, Bin Marsono AK. (2017). Strategies for reducing greenhouse gas emissions from residential sector by proposing new building structures in hot and humid climatic conditions. *Building and Environment*. doi: 10.1016/j.buildenv.2017.08.025.
- Baglivo, Cristina, Paolo M, and Andrea. (2014). Multi-Criteria Optimization Analysis of External Walls According to ITACA Protocol for Zero Energy Buildings in the Mediterranean Climate. *Building and Environment*, 82 (December): 467–80. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2014.09.019>.
- Beccali M., V. Strazzeri, M. L. Germanà, V. Melluso, and A. Galatioto. (2018). Vernacular and Bioclimatic Architecture and Indoor Thermal Comfort Implications in Hot-Humid Climates: An Overview. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 82 (February): 1726–36. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.06.062>.
- Bertrand, Georges, and Jean Tricart. (1968). Paysage et géographie physique globale. Esquisse méthodologique. *Revue géographique des Pyrénées et du Sud-Ouest*. Sud-Ouest Européen, 39 (3): 249–72. <https://doi.org/10.3406/rgpso.1968.4553>.
- Bien Isoler Ma Maison. (s.d.). *Fibre de bois : tout savoir sur cet isolant naturel*. [En ligne]. Disponible sur : <https://www.bien-isoler-ma-maison.fr/isolation-matériau-fibre-de-bois/> (Consulté le 23 novembre 2023).
- Bisoniya, Trilok Singh, Anil Kumar, and Prashant Baredar. (2015). Energy Metrics of Earth–Air Heat Exchanger System for Hot and Dry Climatic Conditions of India. *Energy and Buildings*, 86: 214–21.
- Bodart M. (2002). *Création d'un Outil d'aide Au Choix Optimisé Du Vitrage Du Bâtiment, Selon Des Critères Physiques, Économiques et Écologiques, Pour Un Meilleur Confort Visuel et Thermique*. Louvain:

BIBLIOGRAPHIE

Faculté Des Sciences Appliquées Unité d'Architecture, Université Catholique de Louvain.

Bouden C, and Ghrab N. (2005). An Adaptive Thermal Comfort Model for the Tunisian Context: A Field Study Results. *Energy and Buildings*, 37 (9): 952–63.

Bozonnet E. (2005). *Impact des microclimats urbains sur la demande énergétique des bâtiments - Cas de la rue canyon*. Phd thesis, Université de la Rochelle. <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00011115/document>.

Bouamama W. (2013). *Au sujet de la politique d'Efficacité Énergétique en Algérie : approche Systémique pour un développement durable. cas de : programme Eco-bat*. Université Abou-bakr Belkaid - Tlemcen.

Boursas Ab. (2013). *Etude de l'efficacité énergétique d'un bâtiment d'habitation a l'aide d'un logiciel de simulation*. Université Constantine 1.

Boughedaoui M. (2015). Algérie Rapport D'étude Politiques Nationales et Propositions D'actions En Faveur Du Développement Des Énergies Durables Dans La Planification et La Gestion Locale. Alger. http://www.ces-med.eu/sites/default/files/Algeria_SEAP%20Report_v.2.0_FINAL%20Layouted.pdf.

Breem Scheme Document. (2010). SD 5064BREEAM Multi-Residential 2008. RE Global Ltd.

Brager, Gail, Gwelen Paliaga, and Richard De Dear. (2004). Operable Windows, Personal Control and Occupant Comfort.

Bruno, Roberto, Natale Arcuri, and Cristina Carpino. (2017). Study of Innovative Solutions of the Building Envelope for Passive Houses in Mediterranean Areas. *Energy Procedia*, Beyond NZEB Buildings (AiCARR 50th International Congress, Matera (I), 10-11 May 2017), 140 (December): 80–92. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.11.125>.

Burnett J. (2007). City buildings—eco-labels and shades of green. *Landsc Urban Plan*, 83:29–38.

Camous R, Watson Donald. (1986). *L'habitat bioclimatique*, Etincelle.

Casini, Marco. (2018). Active Dynamic Windows for Buildings: A Review. *Renewable Energy*, 119 (April): 923–34. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2017.12.049>.

Carlucci, Salvatore, Francesco Causone, Lorenzo Pagliano, and Marco Pietrobon. (2017). Zero-Energy Living Lab. In *Smart Energy Control Systems for Sustainable Buildings*, Springer, 1–35..

Cassidy, R. (2003). White paper on sustainability. Building design & construction (p. 11). Reed Business Information. Available at: <http://www.usgbc.org/Docs/Resources/BDCWhitePaperR2.pdf>

Causone, Francesco, Anita Tatti, Marco Pietrobon, Fabio Zanghirella, and Lorenzo Pagliano. (2019). Yearly Operational Performance of a NZEB in the Mediterranean Climate. *Energy and Buildings*, 198 (September): 243–60. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2019.05.062>.

Cécile B. (2016). *Confort thermique et énergie dans l'habitat social en milieu méditerranéen*. Thermique [physics.classph]. Université de Montpellier. <tel-01324038>. HAL. <https://hal.archives-ouvertes.fr/tel-01324038>.

CDER. (2015). *Nouveau Programme National Sur L'efficacité Énergétique (2016-2030)*.

Chenak A. (2009). *Efficacité Énergétique Dans Le Bâtiment Projet Pilote Med-Enec*. La lettre APRUE N°14, , April.

CIB. (2023). *CIB - International Council for Research and Innovation in Building and Construction*. [En ligne] CIB World. Disponible à l'adresse : <https://cibworld.org/> (consulté le 06/12/2023).

C.M. Clewenger, J. Haymaker. (2006). *The Impact of the Building Occupant on Energy Modeling Simulations*.

BIBLIOGRAPHIE

CNERIB. (1997). *DTR C3-2, Réglementation Thermique Des Bâtiments d'Habitation, Règle de Calcul Des Déperditions Calorifiques*. Alger.

———. (1998). *Document Technique, 'DTR C3-4, Règles de Calcul Des Apports Calorifiques Des Bâtiments – Climatization*. Alger.

Chatelet ; et all. (1998). *Architecture climatique*. Edisud, Aix-en-Provence", p9

Charly Guibbaud. n.d. (2018). *LA MAISON KABYLE , ELEMENT STRUCTURANT DE LA SOCIETE KABYLE*. Centre de documentation historique sur l'Algérie. Accessed August 25. http://cdha.fr/sites/default/files/kcfinder/files/Club_Kabylie/La_maison_kabyle_CG_090314.pdf.

Chatelet , FERNANDEZ, and LAVIGNE. Pierre. (1998). *Architecture Climatique. Une Contribution Au Développement Durable*. Tome 2 : Concepts et Dispositifs. EDISUD.

Chavez-Galan, Jesus, and Rafael . (2007). Solar Filters Based on Iron Oxides Used as Efficient Windows for Energy Savings. *Solar Energy*, 81(1): 13–19. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2006.06.009>.

Chlela F. (2008). *Développement D'une Méthodologie de Conception de Bâtiments À Basse Consommation D'énergie*. Université de La Rochelle.

Chow, Tin-tai, Chunying Li, and Zhang Lin. (2010). Innovative Solar Windows for Cooling-Demand Climate. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 94 (2): 212–20. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2009.09.004>.

Collet-Foucault, Florence. (2004). *Caractérisation Hydrique et Thermique de Matériaux de Génie Civil à Faibles Impacts Environnementaux*. Thesis, Rennes, INSA. <http://www.theses.fr/2004ISAR0016>.

Coma Bassas, Ester, Joanne Patterson, and Phillip Jones. (2020). A Review of the Evolution of Green Residential Architecture. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 125 (June): 109796. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.109796>.

Constantin I, Tudor Baracu, Gabriela-Elena Vlad, Horia Necula, Adrian Badea. (2015). The Historical Evolution of the Energy Efficient Buildings. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 49: 243–53.

David Wright. (1979). *Soleil, Nature, Architecture*. Editions Parenthèses.

De Boeck, L., S. Verbeke, A. Audenaert, and L. De Mesmaeker. (2015). Improving the Energy Performance of Residential Buildings: A Literature Review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 52 (December): 960–75. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.07.037>.

De Dear, Richard, and Gail Schiller Brager. (1998) a. Developing an Adaptive Model of Thermal Comfort and Preference.

———. (1998)b. Developing an Adaptive Model of Thermal Comfort and Preference.

De Dear, Richard J., and Gail S. Brager. (2002). Thermal Comfort in Naturally Ventilated Buildings: Revisions to ASHRAE Standard 55. *Energy and Buildings*, 34 (6): 549–561.

Dear, Richard de. (2007). Adaptive Comfort Applications in Australia and Impacts on Building Energy Consumption. In *Proceedings of the Sixth International Conference on Indoor Air Quality, Ventilation and Energy Conservation in Buildings: Sustainable Built Environment*, Sendai, Japan, 28–31. Citeseer.

De Radkowski Hubert Georges. (2002). *anthropologie de l'habiter (vers le nomadisme)*, édition PUF (presses universitaires de France), Paris.

Derradji L, Imessad K, Amara M and Boudali Errebai F. (2017). A study on residential energy requirement and the effect of the glazing on the optimum insulation thickness. *Applied Thermal Engineering*, 112: 975–985, <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2016.10.116>.

BIBLIOGRAPHIE

- D.S. Parker. (2003). Research highlights from a large scale residential monitoring study in a hot climate. *Energy and Buildings*, 35 (9) (2003) 863-876.
- DOE, US. (2014). Windows and Building Envelope Research and Development: Roadmap for Emerging Technologies, US Department of Energy. Buildings Technologies Office, Washington, DC.
- Dong Z, Andrew P, Jing D, Philip A, Yujie L. (2016). Interaction Effects of Building Technology and Resident Behavior on Energy Consumption in Residential Buildings. *Energy and Buildings*. <http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.10.049>
- Donald W et Roger C. (1986). *L'habitat bioclimatique de la conception à la construction*. Edition Etincelle.
- Dutreix A. (2010). Bioclimatisme et performances energetiques des batiments. Eyrolles. [http://dx.b-ok.org/genesis/1435000/3f25fcc7f7e3d5d1768e166e01a28663/_as/\[Armand_Dutreix\]_Bioclimatisme_et_performances_%C3%A9n\(b-ok.org\).pdf](http://dx.b-ok.org/genesis/1435000/3f25fcc7f7e3d5d1768e166e01a28663/_as/[Armand_Dutreix]_Bioclimatisme_et_performances_%C3%A9n(b-ok.org).pdf).
- Du Plessis, C., CIB & UNEP-IETC. (2002). Agenda 21 for Sustainable Construction in Developing Countries. CSIR Report BOU/E0204. Pretoria: CSIR, CIB & UNEP-IETC.
- Dussault, Jean-Michel, and Louis Gosselin. (2017). Office Buildings with Electrochromic Windows: A Sensitivity Analysis of Design Parameters on Energy Performance, and Thermal and Visual Comfort. *Energy and Buildings*, 153 (October): 50–62. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.07.046>.
- D. Yan, W. O'Brien, T. Hong, X. Feng, H. Burak Gunay, F. Tahmasebi, et al. (2015). Occupant behavior modeling for building performance simulation: current state and future challenges. *Energy Build*, 107 264–278, <http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2015.08.032>
- Edward Mazria. (1981). *Le guide de l'énergie solaire passive*. Editions Parenthèses (Traduction française).
- Economiques, Organisation de coopération et de développement. (2013). Transition to Sustainable Buildings: Strategies and Opportunities to 2050. *OECD Publishing*.
- EnEV. (2004). Verordnung über energiesparenden Wärmeschutz und energiesparende Anlagentechnik bei Gebäuden. *Réglementation thermique allemande*. Disponible en ligne. URL : <http://enev-normen.enev-online.de>.
- Erhorn H, Erhorn-Kluttig H; (2011). Terms and definitions for high performance buildings, concerted action report. European Union.
- Ernesto Efrén V. (2015). Processus de Conception Énergétique de Bâtiments Durables. *Arts et Métiers*, ParisTech - Campus de Bordeaux.
- Essick B inventor. (1944). United States Patent Oco, assignee. Pad for evaporative coolers. US patent.
- Etheridge D. Natural ventilation of buildings. (2012). theory, measurement and design. *First Edition John Wiley & Sons Ltd.*;
- European Parliament. (2010). Directive 2010/31/EU of the European Parliament and of Council of 19 May 2010 on the Energy Performance of Buildings (Recast). *Official Journal of the European Union*. Vol. 2010. https://www.seea.government.bg/documents/Consolidated_Directive_844_30.05.2018_EPBD_EN.pdf.
- European Commission. (2014). On Resource Efficiency Opportunities in the Building Sector EC, Brussels, Belgium.
- Fabrizio, Enrico, Federico Seguro, and Marco Filippi. (2014). Integrated HVAC and DHW Production Systems for Zero Energy Buildings. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 40: 515–41.
- Fanger, P. O. (1984). Moderate Thermal Environments Determination of the PMV and PPD Indices and Specification of the Conditions for Thermal Comfort. ISO 7730.

BIBLIOGRAPHIE

- Fanger, Poul O. (1970). Thermal Comfort. Analysis and Applications in Environmental Engineering. Thermal Comfort. Analysis and Applications in Environmental Engineering.
- Feist W. (1998). Cost efficient passive houses in central European climate. Darmstadt, Germany: Passive House Institute.
- Feist, w., schnieders, j. , dorer, v., haas, a.(2005). Re-inventing air heating: convenient and comfortable within the frame of the passive house concept. *Energy and Buildings*. Vol 37 (11). Pp. 1186–1203.
- Firbal D. (2012). Une-technique-ancienne-et-des-technologies-nouvelles. Disponible à l'adresse : [https://dominiquefirbal.wordpress.com/2012/05/05/une-technique-ancienne-et-des-technologies-nouvelles/\(consulté le 06/12/2019\)](https://dominiquefirbal.wordpress.com/2012/05/05/une-technique-ancienne-et-des-technologies-nouvelles/(consulté le 06/12/2019)).
- Forrest Meggers, Hansjürg Leibundgut, Sheila Kennedy, Menghao Qin, Mike Schlaich, Werner Sobek, and Masanori Shukuya. (2012). Reduce CO2 from Buildings with Technology to Zero Emission. *Sustainable Cities and Society*, 2: 29– 36. doi.org/10.1016/j.scs.2011.10.001.
- Forsén M. (2005). Heat pumps: technology and environmental impact Part 1 Sweden. European Heat Pump Association.
- Fortier, J. (2014). Thermochromic VO2 Thin Films Deposited by Magnetron Sputtering for Smart Window Applications.
- Galy, G. (1970). L'Habitat de pierres sèches en Méditerranée nord-occidentale. *Méditerranée*, 1 (2): 95–119. <https://doi.org/10.3406/medit.1970.1350>.
- Garai J. (2009). Physical model for vaporization. *Fluid Phase Equilib*, 283(1–2):89–92. 9/15.
- Genevois H. (1962). *L'habitation Kabyle*. FDB.
- Givoni, B. (1978). *L'homme, l'architecture et le climat*. Éditions du Moniteur.
- Gonzalo R, Karl J. Habermann. n.d. (2006). Architecture et Efficacité Énergétique: Principes de Conception et de Construction. Illustrée. *Springer Science & Business Media*.
- Granderson, Jessica, Guanjing Lin, Rupam Singla, Samuel Fernandes, and Samir Touzani. (2018). Field Evaluation of Performance of HVAC Optimization System in Commercial Buildings. *Energy and Buildings*, 173: 577–86
- Green Building and LEED. Core Concepts Guide. (accédé Mars 30, 2018) <http://faculty.riohondo.edu/jrasmussen/greenleed.pdf>.
- Halawa, E., and J. van Hoof. (2012). The Adaptive Approach to Thermal Comfort: A Critical Overview. *Energy and Buildings*, 51 (August): 101–10. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2012.04.011>.
- Hannachi-Belkadi N. (2008). *Developpement D'une Methodologie D'assistance Au Commissionnement Des Batiments La Faible Consommation D'energie*. L'Université Paris Est.
- High Performance Guidelines: *Triangle Region Public Facilities*, Version 1.0.2001. Available at <http://infohouse.p2ric.org/ref/05/04061/04061.pdf>
- Hoffert, M., Caldeira, K., Benford, G., Criswell, D., Green, C., Herzog, H., et al. (2002). Advanced technology paths to global climate stability, Energy for a greenhouse planet. *Science*, 298(5595),981–987.
- Hoyt Tyler, Schiavon Stefano, Piccioli Alberto, Cheung Toby, Moon Dustin, and Steinfeld Kyle. (2017). CBE Thermal Comfort Tool for ASHRAE-55. <http://comfort.cbe.berkeley.edu/>.
- Hui, S. C. M., (2010). Zero energy and zero carbon buildings: myths and facts, In Proceedings of the

BIBLIOGRAPHIE

- International Conference on Intelligent Systems. *Structures and Facilities (ISSF2010): Intelligent Infrastructure and Buildings*, 12 January 2010, Kowloon Shangri-la Hotel, Hong Kong, China, pp. 15-25. (www.aiib.net).
- Humphreys, Michael A., and J. Fergus Nicol. (1998). Understanding-the-Adaptive-Approach-to-Thermal-Comfort.Pdf. 1998. https://www.researchgate.net/profile/Fergus_Nicol/publication/279888246_Understanding_the_adaptive_approach_to_thermal_comfort/links/58d96d4592851ce5e92ba519/Understanding-the-adaptive-approach-to-thermal-comfort.pdf.
- IchazoM, AlbanoC, GonzalezJ, PereraR, CandalM. (2001).Polypropylene/wood flour composites: treatments and properties) .Compos Struct; 54: 207e14.
- IEA. (2018). *World Energy Balances – Analysis*. IEA. 2018. <https://www.iea.org/reports/world-energy-balances-overview>.
- IISBE. (2009). *International Initiative for a Sustainable Built Environment*. [En ligne] Disponible à l'adresse : URL : <https://www.iisbe.org/> (consulté le 06/12/2023).
- Ionescun C, Tudor Baracu, Gabriela-Elena Vlad, Horia Necula, Adrian Badea. (2015). The Historical Evolution of the Energy Efficient Buildings. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. no. 49:243–253.
- Imessad, K, R Kharchi, S Bouchaib, A Chenak, S Hakem, A Hamidat, and S Larbi-youcef. (2017). Mise en application de la nouvelle réglementation thermique algérienne du bâtiment. *Revue des Energies Renouvelables*. 20 (4): 591–97.
- Imessad, K., L. Derradji, N. Ait Messaoudene, F. Mokhtari, A. Chenak, and R Hepbasli, Arif, Zafer Erbay, Filiz Icier, Neslihan Colak, and Ebru Hancioglu. (2009). A Review of Gas Engine Driven Heat Pumps (GEHPs) for Residential and Industrial Applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*,13 (1): 85–99. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2007.06.014>.
- Imessad K, Derradji L, Ait Messaoudene N et al. (2014). Impact of passive cooling techniques on energy demand for residential buildings in Mediterranean climate. *Renewable Energy*,71: 589–597, <https://doi.org/10.1016/j.renene.2014.06.005>.
- Institute for Building Environment and Energy Conservation (IBEC). (2016). *Comprehensive Assessment System for Built Environment Efficiency CASBEE*. Housing Bureau, Japanese Ministry of Land, Infrastructure, Transport and Tourism (MLIT). Téléchargeable sur : <http://www.ibec.or.jp/CASBEE/english/>.
- Izard J, Alain Guyot. (1979). *Architecture bioclimatique*, Editions Parenthèses, Paris.
- Jianrong T et al. (2011). *Energy Procedia*, 5 708–712.
- Loubes J. (1988). *Maisons Creusées Du Fleuve Jaune: L'architecture Troglodytique En Chine* . creaphis éditions.
- J. Iwaro, A. (2010). Mwasha. *Energy Policy*, 38 7744–7755.
- J. Ouyang, K. Hokao. (2009). Energy-saving potential by improving occupants' behavior in urban residential sector in Hangzhou City, China. *Energy and Buildings*, 41 (7) 711-720. <http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2009.02.003>.
- Journal Officiel. (2006). Arrêté du 24 mai 2006 relatif aux caractéristiques thermiques des bâtiments nouveaux et des parties nouvelles des bâtiments. *Journal Officiel de la République Française*, n 121 du 25 mai 2006.
- K. Manohar, A. Adeyanju. (2016). A comparison of banana fiber thermal insulation with conventional building thermal insulation. *Br. J. Appl. Sci. Technol*, 17 (3) 1–9.
- Kadi Y, Korichi A and Maalouf C. (2023). Improving building energy efficiency and thermal comfort with

BIBLIOGRAPHIE

- natural fibre insulation. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers – Engineering Sustainability*. <https://doi.org/10.1680/jensu.21.00003>
- Kharchi. (2014). Impact of Passive Cooling Techniques on Energy Demand for Residential Buildings in a Mediterranean Climate. *Renewable Energy*, 71: 589–97.
- Karpiscak M, Marion M. (1991). Evaporative cooler water use az9145 US: The University of Arizona.
- K. Ek, P. Söderholm. (2010). The devil is in the details: Household electricity saving behavior and the role of information. *Energy Policy*, 38 (3) 1578-1587.
- Kharrufa SN, Adil Y. (2012). Upgrading the building envelope to reduce cooling loads. *Energy Build.*55:389–96.
- Khellaf, Rebbas. (2014). Développement Durable Au Sein Des Aires Protégées Algériennes, Cas Du Parc National de Gouraya et Des Sites d'intérêt Biologique et Écologique de La Région de Béjaïa.
- Kibert, C. J. (2012). Sustainable construction: green building design and delivery. Hoboken: Wiley.
- Kibert, C.J. (1994). Final Session of First International Conference of CIB TG 16 on Sustainable Construction, Tampa, Florida, 6-9 November.
- Kibert, Charles J. (2016). Sustainable Construction, Green Building Design and Delivery, Fourth Edition. *John Wiley & Sons, Inc.* All rights reserved.
- Klingenberg K. (2008). Passive house concept, history and economic opportunities for the US building sector. The Passive House Institute US (PHIUS).
- Koeppl S, Vorsatz D.(2007). Assessment of policy instruments for reducing greenhouse gas emissions from buildings. Budapest: UNEP SBCI, Central European University.
- Korichi A, Rouag -Saffidine, Sahnoune T. (2007). Post Occupancy Evaluation Programme (or POE): An assessment method for buildings efficiency. *Sciences & Technologie D– N°25*, Juin, pp.08-13
- Kuppaswamy I. (2015). Sustainable Architectural Design: An Overview. *Taylor & Francis*. All rights reserved.
- L.D. Hung Anh, Z. P' asztory. (2021). An overview of factors influencing thermal conductivity of building insulation materials. *J. Build. Eng.* 44 .
- L. Liu, H. Li, A. Lazzaretto, et al. (2017). The development history and prospects of biomass-based insulation materials for buildings. *Renew. Sustain. Energy Rev*, 69 ,912–932.
- Labaki, Lucila C., and Doris C. C. K. Kowaltowski. (1998). Bioclimatic and Vernacular Design in Urban Settlements of Brazil. *Building and Environment*, 33 (1): 63–77. [https://doi.org/10.1016/S0360-1323\(97\)00024-3](https://doi.org/10.1016/S0360-1323(97)00024-3).
- Lassure C. (2011). Série Les Trulli Ou Cased de d'Alberobello (Province de Bari, Italie) à Travers Les Cartes Postales et Photos Anciennes (Series: The Trulli or Casedde of Alberobello, Province of Bari, Italy, through Old Postcards and Photos), Les Trulli. Résumé Historique et Architectural (Trulli. A Historical and Architectural Summary).” August 29, 2011. <http://www.pierreseche.com/trulli.htm>.
- Lakrafli H, Tahiri S, Albizane Abd, Souad El Houssaini, and Mohamed Bouhria. (2017). Effect of Thermal Insulation Using Leather and Carpentry Wastes on Thermal Comfort and Energy Consumption in a Residential Building. *Energy Efficiency*, 10 (5): 1189–99. <https://doi.org/10.1007/s12053-017-9513-8>.
- Lamrani B, Khouya A, and Draoui A. (2019). Energy and Environmental Analysis of an Indirect Hybrid Solar Dryer of Wood Using TRNSYS Software. *Solar Energy*, 183 (May): 132–45. <https://doi.org/u>.
- Latha, P. K., Y. Darshana, and Vidhya Venugopal. (2015). Role of Building Material in Thermal Comfort in

BIBLIOGRAPHIE

- Tropical Climates – A Review. *Journal of Building Engineering*, 3 (September): 104–13. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2015.06.003>.
- Leroux, Marcel. (2001). Les climats subtropicaux dits «méditerranéens» et les climats de la Méditerranée (1re partie). *L'Information Géographique*, 65 (4): 304–20. <https://doi.org/10.3406/ingeo.2001.2773>.
- Lechner R. (2009). *Cooling, lighting: sustainable design methods for architects*. 3rd ed Wiley.
- L'énergie Au Futur. (1997). *Propositions Pour Une Politique Responsable*. Editions d'en bas.
- Li, Bo, Peter Wild, and Rowe A. (2019). Performance of a Heat Recovery Ventilator Coupled with an Air-to-Air Heat Pump for Residential Suites in Canadian Cities. *Journal of Building Engineering*, 21 (January): 343–54. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2018.10.025>.
- Li, Chunying, Junyi Tan, Tin-Tai Chow, and Zhongzhu Qiu. (2015). Experimental and Theoretical Study on the Effect of Window Films on Building Energy Consumption. *Energy and Buildings*, 102 (September): 129–38. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2015.04.025>.
- Li, Huai, Wei Xu, Zhen Yu, Jianlin Wu, and Zhifeng Sun. (2017). Application Analyze of a Ground Source Heat Pump System in a Nearly Zero Energy Building in China. *Energy*, 125 (April): 140–51. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.02.108>.
- Liang, Runqi. (2018). *Development of an Adaptive Façade for Visual Comfort, Daylight and Thermal Control Element*. Thesis (University of Nottingham only). University of Nottingham. July 13, 2018. <http://eprints.nottingham.ac.uk/52111/>.
- Liébard, A, and De Herde A. (2005). *Traité d'architecture et d'urbanisme bioclimatiques : concevoir, édifier et aménager avec le développement durable*. Observ'ER.
- Liu, Di, Fu-Yun Zhao, and Guang-Fa Tang. (2010). Active Low-Grade Energy Recovery Potential for Building Energy Conservation. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14 (9): 2736–47. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2010.06.005>.
- Liu, Zhongbing, Weijiao Li, Yazhen Chen, Yongqiang Luo, and Ling Zhang. (2019). Review of Energy Conservation Technologies for Fresh Air Supply in Zero Energy Buildings. *Applied Thermal Engineering*, 148 (February): 544–56. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2018.11.085>.
- Long, Linshuang, Hong Ye, Haitao Zhang, and Yanfeng Gao. (2015). Performance Demonstration and Simulation of Thermochromic Double Glazing in Building Applications. *Solar Energy*, 120 (October): 55–64. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2015.07.025>.
- Lou Chesné. (2012). *Vers Une Nouvelle Méthodologie de Conception Des Bâtiments Basée Sur Leurs Performances Bioclimatiques*. Institut National des Sciences Appliquées de Lyon.
- Luo, Yongqiang, Ling Zhang, Zhongbing Liu, Yingzi Wang, Fangfang Meng, and Jing Wu. (2016). Thermal Performance Evaluation of an Active Building Integrated Photovoltaic Thermoelectric Wall System. *Applied Energy*, 177 (September): 25–39. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.05.087>.
- Maximilian P, Tobias N, Christian H, Ulrich M, Benjamin K, Mayencourt Paul, Johannes Konnerth. (2023). A review of the resource efficiency and mechanical performance of commercial wood-based building materials. *Sustainable Materials and Technologies*, Volume 38, e00728, ISSN 2214-9937, <https://doi.org/10.1016/j.susmat.2023.e00728>.
- Maison Monde, (2021). *Maisons troglodytes en Andalousie*. [En ligne] Maison Monde. Disponible à l'adresse : <https://maison-monde.com/maisons-troglodytes-andalousie/#59YouHx4Pb0Lj6mO.99> (consulté le 06/12/2022).
- MAES, Pascale. (2014). Ventilation des bâtiments d'habitation. Text. Ref: TIP266WEB - "Techniques du bâtiment: le second œuvre et les lots techniques. September 10, 2014. <https://www.techniques-ingenieur.fr/base-documentaire/construction-et-travaux-publics-th3/techniques-du-batiment-la-climatisation->

BIBLIOGRAPHIE

43815210/ventilation-des-batiments-d-habitation-tba2786/.

Marcus V. (1837). *Les Dix Livres D'architecture de Vitruve*. Volume 2 Bibliothèque Architecturale Ou, Collection Des Auteurs Anciens Qui Ont Traité de L'architecture Les Dix Livres D'architecture de Vitruve, Marcus Vitruvius Pollio. E. Tardieu, A. Coussin e.a.,.

Marszal, Anna Joanna, Per Heiselberg, Julien S. Bourrelle, Eike Musall, Karsten Voss, Igor Sartori, and Assunta Napolitano. (2011). Zero Energy Building—A Review of Definitions and Calculation Methodologies. *Energy and Buildings*, 43 (4): 971–79.

Martonne, Emmanuel de. (1926). L'indice d'aridité. *Bulletin de l'Association de Géographes Français* 3 (9): 3–5. <https://doi.org/10.3406/bagf.1926.6321>.

Mazria, E. (2007). Resuscitating a Dying World. The 2010 Imperative: A Global Emergency Teach-In. In *Architecture 2030*. Feb 20.

Meggers, F., Ritter, V., Goffin, P., Baetschmann, M., & Leibundgut, H. "Low exergy Building System Implementation." *Energy*, doi:10.1016/j.energy.2011.07.031, in press.

Meghraoui C. (2004). *Quel habitat pour l'Algérie (production, conception, réalisation)*. Thèse de doctorat, option architecture et urbanisme, sous-direction de Larouk et Marc cote, faculté des sciences de la terre, Constantine.

Menhoudj, Sayeh, Abderrahmane – Mejedoub Mokhtari, Mohamed-Hichem Benzaama, Chadi Maalouf, Mohamed Lachi, and Mohammed Makhoulouf. (2018). Study of the Energy Performance of an Earth—Air Heat Exchanger for Refreshing Buildings in Algeria. *Energy and Buildings*, 158 (January): 1602–12. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.11.056>.

Meukam P. (2004). *Valorisation Des Briques de Terre Stabilisées En Vue de l'isolation Thermique de Bâtiments*. Université de Yaoundé I, no. 5.00: 10.00.

Mezrag H. (2015). *Le Logement Social Collectif: Entre la Conception et l'Usage. Cas de la Ville de M'sila*. Université Mohamed Khider – Biskra Faculté des Sciences et de la technologie, Département d'architecture.

M. Brandemuehl, K. Field. (2011). Effects of Variations of Occupant Behavior on Residential Building Net Zero Energy Performance. In *12th Conference of International Building Performance Simulation Association, Sydney*, pp. 14-16.

MEM. (2011). *Bilan énergétique national de l'année 2010*. MEM, Alger, 42p.

MESSAOUDI T. (2017). L'architecture Vernaculaire Une Solution Durable: Cas de La Maison Traditionnelle Kabyle (Nord Algérien). In *Les 4ème RIDAAD*. Vaulx-en-Velin, France: École Nationale des Travaux Publics de l'État [ENTPE] et École nationale supérieure de l'architecture de Lyon (ENSAL). <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01683983>

Michael A. Humphreys, and J. Fergus N. (2002). The Validity of ISO-PMV for Predicting Comfort Votes in Every-Day Thermal Environments. *Energy and Buildings*, 34 (6): 667–84.

Miller MA. (2011). An Introduction to the Passive House Standard. *Assoc Archit*;15:2.

Ministère de la Transition écologique et solidaire. (2016). Exigences Réglementaires pour la Construction des Bâtiments. Décembre 2016. <https://www.ecologique-solidaire.gouv.fr/exigences-reglementaires-construction-des-batiments>.

Ministère de la Transition écologique et solidaire. (2017). Bâtiment à Énergie Positive et Réduction Carbone. February 2017. <https://www.ecologique-solidaire.gouv.fr/batiment-energie-positive-et-reduction-carbone>.

Mokhtari A. (2008). Architecture et confort thermique dans les zones arides application au cas de la ville de Béchar. *Revue des Energies Renouvelables*, vol 11, N°2. 307- 315. Disponible sur : <https://research.net/>. Consulté le 28/01/2024.

BIBLIOGRAPHIE

- Molinier, Rene. (1954). Les climax cotiers de la mediterranee occidentale. *Vegetation*, 4 (5): 284–308. <https://doi.org/10.1007/BF00301799>.
- Morelli M, Leif Rønby, Svend Erik Mikkelsen, Maja G. Minzari, Troels Kildemoes, and Henrik M. Tommerup. (2012). Energy Retrofitting of a Typical Old Danish Multi-Family Building to a ‘Nearly-Zero’ Energy Building Based on Experiences from a Test Apartment. *Energy and Buildings*, 54: 395–406.
- Moretti, Elisa, and Elisa Belloni. (2015). Evaluation of Energy, Thermal, and Daylighting Performance of Solar Control Films for a Case Study in Moderate Climate. *Building and Environment*, 94 (December): 183–95. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2015.07.031>.
- Morillón-Gálvez, David, Ricardo Saldaña-Flores, and Adalberto Tejeda-Martínez. (2004). Human Bioclimatic Atlas for Mexico. *Solar Energy*, 76 (6): 781–92. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2003.11.008>.
- Olgay, V. 1953. “Bioclimatic Approach to Architecture.” BRAB Conference Report Vol. 5. Washington, DC: National Research Council.
- Moujalled, Bassam. (2007). *Modélisation Dynamique Du Confort Thermique Dans Les Bâtiments Naturellement Ventilés*. Institut National Des Sciences Appliquées, Lyon, France.
- Naceur F et Farhi A. (2003). Les Zones D’habitat Urbain Nouvelles En Algérie : Inadaptabilité Spatiale et Malaises Sociaux. Cas de Batna. *Revue Algérienne d’anthropologie et de science sociales*, 22, 73–81.
- Nagahama, Tsutomu, Taketoshi Sato, Tatsuya Harima, and Jun Shimizu. (2017). Optical Properties and Field Test Results of Spectrally-Selective Solar Control Window Film That Enables Not Increasing Downward Reflection. *Energy and Buildings*, 157 (December): 176–83. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.01.037>.
- National Renewable Energy Laboratory. Air-source heat pumps. (2001); FS143. US, Department of Energy.
- Nefissa B. (2017). *Contribution À L’évaluation Des Performances Énergétiques et Environnementales D’un Habitat Individuel Bioclimatique : Cas de La Maison Pilote de Souidania –Alger- (Algérie)*. Université Hassiba Benbouali de Chlef.
- Ng, Lisa C., and W. Vance Payne. (2016). Energy Use Consequences of Ventilating a Net-Zero Energy House. *Applied Thermal Engineering*, 96 (March): 151–60. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2015.10.100>
- Nicol F, and Michael Humphreys. (2010). Derivation of the Adaptive Equations for Thermal Comfort in Free-Running Buildings in European Standard EN15251. *Building and Environment*, 45 (1): 11–17.
- Nicol J. Fergus. (2001). Characterising Occupant Behaviour in Buildings: Towards a Stochastic Model of Occupant Use of Windows, Lights, Blinds, Heaters and Fans. *In Proceedings of the Seventh International IBPSA Conference*, Rio, 2:1073–78.
- Nicol J. Fergus, and Michael A. Humphreys. (1973). Thermal Comfort as Part of a Self-Regulating System.
- . 2002. Adaptive Thermal Comfort and Sustainable Thermal Standards for Buildings. *Energy and Buildings*, 34 (6): 563–572.
- Noriko A, Nobuo O, Mitsuki M, Nobuhiro SHIMADA, and Hideharu NIWA Dr.Eng. (2005). Comparison Among Results Of Various Comprehensive Assessment Systems -Case Study For A Model Building Using Casbee, Breeam And Leed. *The 2005 World Sustainable Building Conference*, 1734–37. I Tokyo.
- O’Connor, Dominic, John Kaiser S. Calautit, and Ben Richard Hughes. (2016). A Review of Heat Recovery Technology for Passive Ventilation Applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 54 (February): 1481–93. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.10.039>.
- O Efeoma, Meshack, and Ola Uduku. (2014). Assessing Thermal Comfort and Energy Efficiency in Tropical African Offices Using the Adaptive Approach. *Structural Survey*, 32 (5): 396–412.

BIBLIOGRAPHIE

- Office of the Federal Environmental Executive. (2003). The Federal Commitment to Green Building: Experiences and Expectations. 18 September
- Olgyay, V., D. Lyndon, J. Reynolds, and K. Yeang. (2015). Design with Climate: Bioclimatic Approach to Architectural Regionalism. New and Expanded Edition. Princeton University Press. <https://books.google.dz/books?id=RRQ-CgAAQBAJ>.
- Olissan O. (2017). *Influence de La Fenestration En Vitre Sur Le Confort Thermique Des Bâtiments En Climat Tropical et Humide: Cas de La Bande Côtière Du Bénin*. Université de Liège, Liège, Belgique.
- Sidler O. (2017). Logement à Faibles Besoins en Énergie, Guide de Recommandations et Aide à la Conception. (ADEM/Conseil général de Savoie). Mars 2000. (Accessed October 31, 2017). <https://www.autoconstruction.info/sites/www.autoconstruction.info/IMG/pdf/guide.pdf>.
- Omran Hossein, Ali Ghaffarianhoseini, Amirhosein Ghaffarianhoseini, Kaamran Raahemifar, and John Tookey. (2016). Application of Passive Wall Systems for Improving the Energy Efficiency in Buildings: A Comprehensive Review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 62: 1252–69.
- Omer AM. (2008). Energy, Environment and Sustainable Development. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 12:2265–300.
- Oropeza-Perez, Ivan, and Poul Alberg Stergaard. (2018). Active and Passive Cooling Methods for Dwellings: A Review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, no. 82:531–544.
- O. Guerra Santin, L. Itard, H. Visscher. (2009). The Effect of Occupancy and Building Characteristics on Energy Use for Space and Water Heating in Dutch Residential Stock. *Energy Build.* 41, 1223–1232.
- Panayiotou, G. P., S. A. Kalogirou, and S. A. Tassou. (2016). Evaluation of the Application of Phase Change Materials (PCM) on the Envelope of a Typical Dwelling in the Mediterranean Region. *Renewable Energy*, 97 (November): 24–32. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2016.05.043>.
- Passive House Institute. (2016). Criteria for the Passive House, EnerPHit and PHI Low Energy Building Standard. Germany. www.passivehouse.com
- Parlement européen, Conseil de l'Union européenne, (2002). Directive 2002/91/CE du Parlement européen et du Conseil du 16 décembre 2002 sur la performance énergétique des bâtiments. *Journal officiel* n° L 001 du 04/01/2003 p.0065-0071. http://www.passiv.de/en/02_informations/02_passive-house-requirements/02_passive-house-requirements.htm
- Peel, M. C., B. L. Finlayson, and T. A. McMahon. (2007). Updated World Map of the Köppen-Geiger Climate Classification. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 11 (5): 1633–44. <https://doi.org/10.5194/hess-11-1633-2007>.
- Pereira J, M. Glória Gomes, A. Moret Rodrigues, and Manuela Almeida. (2019). Thermal, Luminous and Energy Performance of Solar Control Films in Single-Glazed Windows: Use of Energy Performance Criteria to Support Decision Making. *Energy and Buildings*, 198 (September): 431–43. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2019.06.003>.
- Photo Autogyre. (2015). VMC double flux: oui ou non?? April 7, 2015. <https://www.lanouvellerepublique.fr/economie/vmc-double-flux-oui-ou-non>.
- Pierre TITTELEIN, (2008). *Environnements de Simulation Adaptés À L'étude Du Comportement Énergétique Des Bâtiments Basse Consommation*. UNIVERSITÉ DE SAVOIE
- P.O. Fanger. (1972). Thermal Comfort: Analysis and Applications in Environmental Engineering: Fanger, P.O. Danish Technical Press, Copenhagen, Denmark, 1970, 244 Pp.: Abstr. in World Textile Abstracts. *Applied Ergonomics*, 3 (3): 181. [https://doi.org/10.1016/S0003-6870\(72\)80074-7](https://doi.org/10.1016/S0003-6870(72)80074-7).
- Pro Elec. (2019). Rénovation de votre habitat, travaux et bricolage. January 21, 2019. <https://www.maisonentravaux.fr/couts-travaux/prix-vmc-double-flux-thermodynamique/>.

BIBLIOGRAPHIE

- Stamatakis, A., M. Mandalaki, and T. Tsoutsos. (2016). Multi-Criteria Analysis for PV Integrated in Shading Devices for Mediterranean Region. *Energy and Buildings*, 117 (April): 128–37. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.02.007>.
- Public Law. (2007). Energy Independence And Security. *Act Of 2007*, 110–140—Dec. 19. <https://www.gpo.gov/fdsys/pkg/Plaw-110publ140/pdf/Plaw-110publ140.pdf>.
- RETA, (2018). *Réglementation Thermique Algérienne RETA V2.0*. [en ligne] CDER. Disponible sur : <http://reta.cder.dz> (Consulté en Novembre 2018).
- Richard C. Hill & Paul A. Bowen. (1997). Sustainable Construction: Principles and a Framework for Attainment. *Construction Management and Economics*, 15: 223± 239.
- Roulet Claude-Alain. (1987). *Energétique du bâtiment I, Interactions entre le climat et le bâtiment*. presse polytechniques romandes, Lausanne.
- Roulet C. (2012). *Éco-Confort : Pour Une Maison Saine et À Basse Consommation D'énergie*. PPUR Presses polytechniques.
- Rupp, Ricardo Forgiarini, Natalia Giraldo Vásquez, and Roberto Lamberts. (2015). A Review of Human Thermal Comfort in the Built Environment. *Energy and Buildings*, 105 (October): 178–205. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2015.07.047>.
- Salomon, Thierry et Bedel, Stéphane. (2004). *Le Guide Malin de l'Énergie Chez Soi. Mens : Terre vivante. La Maison des [néga]Watts*, ISBN: 2-904082-77-8.
- SEMAHI Samir. (2013). Contribution Méthodologique à la Conception des Logements à Haute Performance Énergétique (HPE) en Algérie: Développement d'une Approche de Conception Dans Les Zones Arides et Semi-Arides.
- Sénit, C. (2008). L'efficacité énergétique dans le secteur résidentiel : une analyse des politiques des pays Sud et de l'Est de la Méditerranée Iddri – Idées pour le débat N°14/2008, p 9,10, 12, et 17.
- Serghides, Despina, Stella Dimitriou, Ioanna Kyprianou, and Costas Papanicolas. (2017). The Adaptive Comfort Factor in Evaluating the Energy Performance of Office Buildings in the Mediterranean Coastal Cities. *Energy Procedia, Sustainability in Energy and Buildings 2017: Proceedings of the Ninth KES International Conference, Chania, Greece, 5-7 July 2017*, 134 (October): 683–91. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.09.588>.
- Singh, Manoj Kumar, Sadhan Mahapatra, and S. K. Atreya. (2009). Bioclimatism and Vernacular Architecture of North-East India. *Building and Environment*, 44 (5): 878–88. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2008.06.008>.
- Shan Hu., Da Yan, Siyue Guo, Ying Cui, and Bing Dong. (2017). A Survey on Energy Consumption and Energy Usage Behavior of Households and Residential Building in Urban China. *Energy and Buildings*, 148 (August): 366–78. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.03.064>.
- Shan, Ming., & Hwang, Bon-gang. (2018). Green Building Rating Systems: Global Reviews of Practices and Research Efforts. *Sustainable Cities and Society*, <https://doi.org/10.1016/j.scs.2018.02.034>.
- Stasi, Roberto, Stefania Liuzzi, Salvatore Paterno, Francesco Ruggiero, Pietro Stefanizzi, and Antonio Stragapede. (2020). Combining Bioclimatic Strategies with Efficient HVAC Plants to Reach Nearly-Zero Energy Building Goals in Mediterranean Climate. *Sustainable Cities and Society*, September, 102479. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2020.102479>.
- Stéphane THIERS. (2008). *Bilans Énergétiques Et Environnementaux De Bâtiments À Énergie Positive. École Nationale Supérieure des Mines de Paris*. <https://pastel.archives-ouvertes.fr/pastel-00004692>.
- Sudhakar, K., Maximilian Winderl, and S. Shanmuga Priya. (2019). Net-Zero Building Designs in Hot and

BIBLIOGRAPHIE

- Humid Climates: A State-of-Art. *Case Studies in Thermal Engineering*, 13 (March): 100400. <https://doi.org/10.1016/j.csite.2019.100400>.
- T. Wang et al. (2016). Renewable and Sustainable. *Energy Reviews*, 56 .484–493.
- Tällberg, Rickard, Bjørn Petter Jelle, Roel Loonen, Tao Gao, and Mohamed Hamdy. (2019). Comparison of the Energy Saving Potential of Adaptive and Controllable Smart Windows: A State-of-the-Art Review and Simulation Studies of Thermochromic, Photochromic and Electrochromic Technologies. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 200 (September): 109828. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2019.02.041>.
- Tassin, Claude. (2012). Paysages végétaux du domaine méditerranéen: bassin méditerranéen, Californie, Chili central, Afrique du Sud, Australie méridionale. IRD Editions. http://horizon.documentation.ird.fr/exl-doc/pleins_textes/divers14-01/010055378.pdf.
- Teixeira, Henriqueta, M. Glória Gomes, A. Moret Rodrigues, and Júlia Pereira. (2020). Thermal and Visual Comfort, Energy Use and Environmental Performance of Glazing Systems with Solar Control Films. *Building and Environment*, 168 (January): 106474. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2019.106474>.
- Toe, Doris Hooi Chyee, and Tetsu Kubota. (2013). Development of an Adaptive Thermal Comfort Equation for Naturally Ventilated Buildings in Hot–Humid Climates Using ASHRAE RP-884 Database. *Frontiers of Architectural Research*, 2 (3): 278–91. <https://doi.org/10.1016/j.foar.2013.06.003>.
- Robinson T, MS. (2014). *High-Performance Buildings: A Guide for Owners & Managers*. Published by The Fairmont Press, Inc.
- Torcellini, P et al. (2006). Zero Energy Buildings: A Critical Look at the Definition. In *Proceedings of the 2006 ACEEE Summer Study on Energy Efficiency in Buildings, August 14–18, 2006, Pacific Grove, CA*, 12 pp.
- Truong, Harley, and Andrew M. Garvie. (2017). Chifley Passive House: A Case Study in Energy Efficiency and Comfort. *Energy Procedia*, Improving Residential Energy Efficiency International Conference, IREE 2017, 121 (September): 214–21. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.08.020>.
- Trzpit, Jean-Paul. (1980). La Méditerranée, un creuset d'humidité. *Méditerranée*, 40 (4): 13–28. <https://doi.org/10.3406/medit.1980.1951>.
- Tzempelikos, Athanassios, and Andreas K. Athienitis. (2007). The Impact of Shading Design and Control on Building Cooling and Lighting Demand. *Solar Energy*, 81 (3): 369–82. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2006.06.015>.
- Tzikopoulos, A. F., M. C. Karatza, and J. A. Paravantis. (2005). Modeling Energy Efficiency of Bioclimatic Buildings. *Energy and Buildings*, 37 (5): 529–44. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2004.09.002>.
- UNEP SBCI. (2009). *Buildings and climate change-summary for decision-makers In: Yamamoto, J, Graham, editors. UNEP sustainable buildings & climate initiative*.
- V. Belessiotis, E. Mathioulakis. (2002). Analytical approach of thermosyphon solar domestic hot water system performance. *Sol. Energy*, 72 .307–315, [http://dx.doi.org/10.1016/S0038-092X\(02\)00011-7](http://dx.doi.org/10.1016/S0038-092X(02)00011-7).
- V. Fabi, Buso, R.K. Andersen, S.P. Corgnati, B.W. Olesen. (2006). Robustness of building design with respect to energy related occupant behaviour. In: *13th Conference of International Building Performance Simulation Association*, 2013, pp.1999–2006.
- Vieira, P. S., & Horvath, A. (2008). Assessing the end-of-life impacts of buildings. *Environmental Science & Technology*, 42(13), 4663–4669. doi:10.1021/es0713451.
- Voss, Karsten, and Eike Musall. (2012). Net Zero Energy Buildings: International Projects of Carbon Neutrality in Buildings. Walter de Gruyter.
- Vural, Nilhan, Serbüent Vural, Nihan Engin, and M. Reşat Sümerkan. (2007). Eastern Black Sea Region—A

BIBLIOGRAPHIE

- Sample of Modular Design in the Vernacular Architecture. *Building and Environment*, 42 (7): 2746–61.
- Wei P. (2014). "Renewable and Sustainable" Energy Reviews 37 ,424–434
- Wei P, Garmston, H. (2012)." Compliance with Building Energy Regulations for NewBuild Dwellings". *Energy*, 48(1), 11-22.
- Wei Pan. (2013). *Building Journal*, building.com.hk
- Wang T, Foliente G, Song X, Xue J, Fang D. (2014). Implications and future direction of greenhouse gas emission mitigation policies in the building sector of China. *Renew Sustain Energy Rev*, 31, 520–30.
- Wang, Yang, Jens Kuckelkorn, Fu-Yun Zhao, Hartmut Spliethoff, and Werner Lang. (2017). A State of Art of Review on Interactions between Energy Performance and Indoor Environment Quality in Passive House Buildings. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 72 (May): 1303–19. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.10.039>.
- Wilford, C. and Ramos, M. (2009). Zero Carbon Compendium: Who’s Doing What in Housing Worldwide. NHBC Foundation, Amersham.
- Wyatt, D.P. (1994). Recycling and Serviceability: The Twin Approach to Securing Sustainable Construction. *In Proceedings of First International Conference of CIB TG 16 on Sustainable Construction*, Tampa, Florida, 6- 9 November, pp. 69-78.
- Wulfingho DR.(1999). Compression cooling. Energy efficiency manual. *1st ed Energy Institute Press*; p. 1299–321.
- Wu, Wei, Harrison M. Skye, and Piotr A. Domanski. 2018. “Selecting HVAC Systems to Achieve Comfortable and Cost-Effective Residential Net-Zero Energy Buildings.” *Applied Energy* 212 (February): 577–91. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.12.046>.
- Xingrong Lian, Lin Tian, Zengyao Li, Xinpeng Zhao. (2024). Thermal conductivity analysis of natural fiber-derived porous thermal insulation materials. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, volume 220, ,124941,ISSN 0017-9310,<https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2023.124941>.
- Xu, XiaoJie, Xi Wu, Chao Zhao, JiangXiang Wang, and XiaoTong Ge. (2012). Simulation and Improvement of Energy Consumption on Intelligent Glasses in Typical Cities of China. *Science China Technological Sciences*, 55 (7): 1999–2005. <https://doi.org/10.1007/s11431-012-4854-1>.
- Ye, Hong, Xianchun Meng, Linshuang Long, and Bin Xu. (2013). The Route to a Perfect Window. *Renewable Energy* 55 (July): 448–55. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2013.01.003>.
- Yin, Rongxin, Peng Xu, and Pengyuan Shen. (2012). Case Study: Energy Savings from Solar Window Film in Two Commercial Buildings in Shanghai. *Energy and Buildings*, 45: 132–40.
- Yoshino H, Tianzhen Hong, and Natasa Nord. (2017). IEA/EBC Annex 53: Total energy use in buildings—Analysis and Evaluation Methods, no. 152: 124–136.
- Yudelson J and Meyer Ulf. (2013). The World’s Greenest Buildings: Promise versus Performance in Sustainable Design. Routledge, Taylor & Francis Group. [http://dlx.bok.org/genesis/1394000/cdbf20329c7d595ed8917f3eee7b6a9c/_as/\[Jerry_Yudelson,_Ulf_Meyer\]_The_World’s_Greenest_B\(b-ok.org\).pdf](http://dlx.bok.org/genesis/1394000/cdbf20329c7d595ed8917f3eee7b6a9c/_as/[Jerry_Yudelson,_Ulf_Meyer]_The_World’s_Greenest_B(b-ok.org).pdf).
- Yüksek, İzzet. (2015). The Evaluation of Building Materials in Terms of Energy Efficiency. *Periodica Polytechnica Civil Engineering*, 59 (1): 45–58.
- Z.-J. Li, Y. Jiang, Q.-P. Wei. (2014). Survey on Energy Consumption of Air Conditioning in summer in a Residential Building in Beijing. *Heat. Vent. Air Cond*, 37, 46–51.
- Z.M. Zain, M.N. Taib, S.M.S. Baki. (2007). Hot and Humid Climate: Prospect for Thermal Comfort in

BIBLIOGRAPHIE

Residential Building. *Desalination*, 209 (1) 261-268.

Zhai Z. (2006) . Numerical Study of Optimal Building Scales with Low Cooling Load in Both Hot and Mild Climatic Regions. *American Solar Energy Society - Solar 2006: 35th ASES Annual Conf., 31st ASES National Passive Solar Conf., 1st ASES Policy and Marketing Conf., ASME Solar Energy Division Int. Solar Energy Conference*, 3. p. 1516–21.

Zhang, Yufeng, and Rongyi Zhao. (2009). Relationship between Thermal Sensation and Comfort in Non-Uniform and Dynamic Environments. *Building and Environment*, The 6th International Conference on Indoor Air Quality, Ventilation & Energy Conservation in Buildings (IAQVEC 2007), Sendai, Japan, 28-31 October, 2007, 44 (7): 1386–91. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2008.04.006>.

Zhou, Feng, Wei Duan, and Guoyuan Ma. (2017). Thermal Performance of a Pump-Driven Loop Heat Pipe as an Air-to-Air Energy Recovery Device. *Energy and Buildings*, 151: 206–16.

Zhou, Zhihua, Lei Feng, Shuzhen Zhang, Chendong Wang, Guanyi Chen, Tao Du, Yasong Li, and Jian Zuo. (2016). The Operational Performance of ‘Net Zero Energy Building’: A Study in China. *Applied Energy*, 177: 716–28.

LISTE DES ANNEXES

ANNEXE A : Description des symboles climatique de Koppen et définition des critères, (source : Peel, Finlayson, and McMahon 2007)

1ère lettre : type de climat :

Code	Type	Description
A	Climat tropical	<ul style="list-style-type: none"> • Température moyenne de chaque mois de l'année > 18 °C • Pas de saison hivernale • Fortes précipitations annuelles (supérieure à l'évaporation annuelle)
B	Climat sec	<ul style="list-style-type: none"> • Evaporation annuelle supérieure aux précipitations annuelles • Aucun cours d'eau permanent
C	Climat tempéré	<ul style="list-style-type: none"> • Températures moyennes des 3 mois les plus froids comprises entre -3 °C et 18 °C • Température moyenne du mois le plus chaud > 10 °C • Les saisons été et hiver sont bien définies
D	Climat continental	<ul style="list-style-type: none"> • Température moyenne du mois le plus froid < -3 °C • Température moyenne du mois le plus chaud > 10 °C • Les saisons été et hiver sont bien définies
E	Climat polaire	<ul style="list-style-type: none"> • Température moyenne du mois le plus chaud < 10 °C • La saison d'été est très peu marquée

2ème lettre : régime pluviométrique

Code	Description	S'applique à
S	Climat de steppe Précipitations annuelles comprises entre 380 et 760 mm	B
W	Climat désertique Précipitations annuelles < 250 mm	B
f	Climat humide Précipitations tous les mois de l'année Pas de saison sèche	A-C-D
w	Saison sèche en hiver	A-C-D
s	Saison sèche en été (au moins un mois d'été où $P < 2T$ et P du mois le plus sec < $1/3 P$ du mois le plus humide)	A-C-D
m	Climat de mousson : Précipitations annuelles > 1500 mm Précipitations du mois le plus sec < 60 mm	A
T	Température moyenne du mois le plus chaud comprise entre 0 °C et 10 °C	E
F	Température moyenne du mois le plus chaud < 0 °C	E
M	Précipitations abondantes Hiver doux (Température moyenne du mois le plus froid > -10 °C)	E

- Af : climat équatorial
- Aw : climat de savane avec hiver sec
- As : climat de savane avec été sec
- Am : climat de mousson
- BS : climat de steppe (semi-aride)
- BW : climat désertique

- Cf : climat tempéré chaud sans saison sèche
- Cw : climat tempéré chaud avec hiver sec
- Cs : climat tempéré chaud avec été sec (méditerranéen)
- Df : climat continental froid sans saison sèche
- Dw : climat continental froid avec hiver sec
- Ds : climat continental froid avec été sec (continental méditerranéen)
- ET : climat de toundra
- EF : climat d'inlandsis
- EM : climat subpolaire océanique.

3ème lettre : variations de température : Pour affiner les types B, C et D, une troisième lettre précise

les variations de température :

Code	Description	S'applique à
a : été chaud	<ul style="list-style-type: none"> • Température moyenne du mois le plus chaud $> 22\text{ °C}$ 	C-D
b : été tempéré	<ul style="list-style-type: none"> • Température moyenne du mois le plus chaud $\leq 22\text{ °C}$ • Températures moyennes des 4 mois les plus chauds $> 10\text{ °C}$ 	C-D
c : été court et frais	<ul style="list-style-type: none"> • Température moyenne du mois le plus chaud $< 22\text{ °C}$ • Températures moyennes mensuelles $> 10\text{ °C}$ pour moins de 4 mois • Température moyenne du mois le plus froid $> -38\text{ °C}$ 	C-D
d : hiver très froid	<ul style="list-style-type: none"> • Température moyenne du mois le plus froid $< -38\text{ °C}$ 	D
h : sec et chaud	<ul style="list-style-type: none"> • Température moyenne annuelle $> 18\text{ °C}$ 	B
k : sec et froid	<ul style="list-style-type: none"> • Température moyenne annuelle $< 18\text{ °C}$ 	B

ANNEXES B : TABLEAUX DE MAHONEY

1. Les données climatiques de la wilaya de Bejaia dans la période (2009-2013), (Source : station métrologique, aéroport de Bejaia).

	JAV	FEV	MARS	AVR	MAI	JOIN	JUIL	AOUT	SEP	OCT	NOV	DEC
TM moy min (°C)	7,9	6,2	9,3	11,6	14,4	17,5	21,4	21,5	19,3	16,7	12,5	9,2
TM moy max (°C)	16,8	15,2	19,1	20,9	23,9	27,1	30,4	31,1	28,2	26,2	21,7	18,5
TM moy (°C)	11,2	10,6	13,8	16	18,6	21	25,4	22	23,2	20,2	15,8	12,6
Hm moy min %	75	73	74	78	77	74	72	72	77	77	75	67
Hm moy max %	82	85	79	84	83	83	82	80	84	79	86	82
Hm moy %	79,6	79,2	79,4	81	79,8	78,4	76,8	77,4	80	77,8	79,2	76,4
Pp moy mm	113,8	153,8	71	70,2	61,6	15,8	3,4	35,2	69,6	85	130	86,6
In moy (heure)	159,2	149,8	203,4	208,2	269,6	310,8	319,6	313	237,4	222,4	165	162,6
Valeurs du vent %	3.9	3.7	3.5	3.3	3.1	3.1	3.1	3.3	3.1	3.3	3.7	3.9

TABLEAU DE MAHONEY

Location	Bejaia
Longitude	5.06
Latitude	36.75
Altitude	34

Température de l'air (°C) :

Température (°C)	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
Température mensuelle max.	16,8	15,2	19,1	20,9	23,9	27,1	30,4	31,1	28,2	26,2	21,7	18,5
Température mensuelle min.	7,9	6,2	9,3	11,6	14,4	17,5	21,4	21,5	19,3	16,7	12,5	9,2
Portée (Amplitude)	8.9	9	9.8	9.3	9.5	9.6	9	9.6	8.9	9.5	9.2	9.5
	AMT= (T max + T min)/2					T max=31.1°C			AMT=18.65			
	AMR= T max - T min.					T min=6.2°C			AMR=24.9			

Humidité Relative En % :

Humidité (%)	Jav	Fev	Mar	Avr	Mai	Juin	Juil	Aou t	Sep	Oct	Nov	Dec	
Humidité moy men max.	82	85	79	84	83	83	82	80	84	79	86	82	
Humidité moy men min.	75	73	74	78	77	74	72	72	77	77	75	67	
Moyenne mensuelle	79,6	79,2	79,4	81	79,8	78,4	76,8	77,4	80	77,8	79,2	76,4	
Groupe d'humidité	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	
										Groupe d'humidité		Humidité relative	
										1		HR < 30%.	
										2		HR : 30-50 %.	
										3		HR : 50-70 %.	
										4		HR < 70 %.	

Précipitations et vents :

	Jav	Fev	M ar	Av r	M ai	Jui n	Juil	Aou t	Se p	Oc t	No v	Dec	
Précipitatio ns en mm	113, 8	153, 8	71	70, 2	61, 6	15, 8	3,4	35,2	69, 6	85	13 0	86,6	= 896mm
Vitesse du vent (m/s)	3.9	3.7	3.5	3.3	3.1	3.1	3.1	3.3	3.1	3.3	3.7	3.9	= 3.4m/s

Limites du confort :

Groupe d'humidité	AMT >20 °C		AMT 15-20 °C		AMT < 15 °C	
	Confort jour	Confort nuit	Confort jour	Confort nuit	Confort jour	Confort nuit
	Min	Max	Min	Max	Min	Max
1	26-34	17-25	23-32	14-23	21-30	12-21
2	25-31	17-24	22-30	14-22	20-27	12-20
3	23-29	17-23	21-28	14-21	19-26	12-19
4	22-27	17-21	20-25	14-20	18-24	12-18

Diagnostic de température en (°C) :

	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
Température mensuelle max.	11,2	10,6	13,8	16	18,6	21	25,4	22	23,2	20,2	15,8	12,6
Confort jour: Sup.	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25
Confort jour: inf.	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20
Température mensuelle min.	7,9	6,2	9,3	11,6	14,4	17,5	21,4	21,5	19,3	16,7	12,5	9,2
Confort nuit: Sup.	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20
Confort nuit: inf.	14	14	14	14	14	14	14	14	14	14	14	14
Confort thermique jour.	C	C	C	C	C	H	H	H	H	O	C	C
Confort thermique nuit.	C	C	C	C	O	H	H	H	H	H	C	C
Groupe d'humidité	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
	Avec: O : Confort Chaud C : Froid, H:											

Application :

	Indicateurs	confort thermique		pluviométrie	groupe d'humidité	Amplitude mensuelle
		Jour	Nuit			
Mouvement essentiel de l'air	H1	H			4	
		H			2-3	moins de 10 °C
Mouvement indésirable de l'air	H2	O			4	
Quantité de pluie nécessaire	H3			plus de 200mm		
Capacité thermique nécessaire.	A1				1-2	plus de 10 °C
Température extérieure désirable.	A2		H		1-2	
		H	O		1-2	Plus de 10 °C
Protection contre le froid.	A3					

Indicateurs :

	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	Total
Humide													
H1						+	+	+	+				4
H2										+			1
H3	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	12
Aride													
A1													0
A2													0
A3	+	+	+	+	+						+	+	7

Les recommandations spécifiques :

Indicateurs					
H1	H2	H3	A1	A2	A3
4	1	12	0	0	7

						Disposition du plan de masse		
			0-10			+	1	Orientation Nord et Sud (suivant un axe longitudinal est-ouest)
					5-12			
			11.12		0-4		2	Plan compact avec cour intérieure

						Espacement entre bâtiments :		
11.12							3	Grand espacement entre les bâtiments.
2-10						+	4	Grand espacement entre bâtiments avec protection contre le vent.

						Circulation de l'air :		
0.1							5	Plan compact.
3-12						+	6	Circulation d'air Permanente.
			0-5					
1.2			6-12				7	Circulation d' air intermittent.
0.1							8	Circulation d' air inutile.

						Ouvertures :		
			0-1		0		9	Grande ouvertures des façades N et S 40-80 %
			11.12		0.1		10	Très petites ouvertures 10-20 %
N'importe qu'elle autre condition						+	11	Ouvertures moyennes 20-40%

						Murs:		
			0-2			+	12	Murs légers.
			3-12				13	Murs intérieurs et extérieurs lourds (massifs)

						Toit:		
			0.5			+	14	Toitures légères et isolantes.
			6-12				15	Toitures lourdes, déphasage plus de 8H.

						Terrasse:		
				2-12			16	Espace extérieur pour dormir demandé.
						Protection contre la pluie:		
		3-12				+	17	Protection nécessaire contre la pluie.

Les recommandations de détails :

Indicateurs					
H1	H2	H3	A1	A2	A3
4	1	12	0	0	7

						Dimensions des ouvertures :		
			0-1		0		1	Large: 40-80%
					1-12	+	2	Moyenne : 25-40 %
			2-5				3	Petites : 15-25 %
			6-10				4	Très petites : 10-20 %
			11.12		0-3		5	Moyennes : 25-40 %
					4-12			

						Position des Ouvertures:		
		3-12				+	6	Au Nord et au Sud, murs s'élevant face au vent.
		1-2		0-5			7	Hautes ouvertures dans les murs intérieurs.
				6-12				
		0	2-12					

						Protection des ouvertures :		
					0-2		8	Exclure rayonnement direct.
			2-12			+	9	Protection contre la pluie.

						Murs et Planchers :		
		0-2				+	10	Leger, Capacité thermique faible.
		3-12					11	Lourd, Déphasage plus de 8H.

						Toitures:		
			0-2				12	Toitures légères.
10.12			3-12			+	13	Toitures légères et isolantes.
			0-5					
0-9			6-12				14	Toiture lourdes, Déphasage au-delà de 8H.

						Dispositifs externes :		
				1-12		+	15	Espace extérieure pour dormir.
		1-12				+	16	Drainage adéquat des pluies.

ANNEXES C : DONNEES DU DTR

1. Les exigences réglementaires du DTR qui contribuent à diminuer la consommation du chauffage climatisation :

Sur le Document Technique Règlementaire DTR C3-2, intitulé "Réglementation thermique des bâtiments d'habitation, Règles de calcul des déperditions calorifiques". il est important de savoir les voies des déperditions nécessairement à prendre en compte lors du dimensionnement des installations de chauffage, les méthodes et procédures de calcul des déperditions calorifiques des logements, les déperditions de référence, les déperditions de base, les températures extérieure et intérieure de base (en relation avec les données climatiques de la région), et la conception thermique du bâtiment, par exemple, le règlement sur le type de la paroi (CNERIB 1997). Pour qu'une paroi soit considérée comme isolée, elle doit répondre à trois conditions principales :

Haut du formulaire

-la fonction d'isolation est assurée par un feuillet de matériau isolant dont la conductivité thermique est inférieure à $0.12 \text{ W/m}^\circ\text{C}$;

-l'épaisseur du feuillet isolant assure une résistance thermique supérieure à $0,5 \text{ m}^2 \text{ }^\circ\text{C/W}$

-l'isolant est placé soit sur la face intérieure du mur extérieur, soit sur la face extérieure du mur extérieur, et doit constituer à lui seul au moins 80 % de la résistance thermique totale de la paroi, laquelle est calculée sans tenir compte des résistances superficielles. Dans le cas d'un mur à double paroi comportant une lame d'air sans isolant thermique, il constitue une paroi à isolation répartie, elle est une paroi sans isolation.

2. Les méthodes de détermination des apports calorifiques des bâtiments :

- Les caractéristiques climatiques de base de l'air extérieure sont en fonction de la zone climatique et l'altitude conformément à la classification thermique.
- il est recommandé d'établir le calcul des apports de chaleur durant principalement le mois de juillet et les deux mois Aout, Septembre.
- Les valeurs du rayonnement total de base sont données dans un tableau, il dépend de certaines conditions de référence et du vitrage de référence (qui est un vitrage ordinaire en simple épaisseur sans aucune occultation avec un encadrement en bois).
- Dans les conditions intérieures de base : deux niveaux du confort sont prévus : le confort dit « normal » pour les applications courantes et le confort dit « amélioré » lorsque le confort est privilégié à l'aspect économique.
- Des conditions de base définies par la température sèche et humidité relative de l'air intérieur assurent une sensation thermique acceptable dans le cas du confort normal et l'accroissement de la température intérieure sèche est toléré dans les heures de pointes (lors des gains maxima par transmission à travers les parois, l'éclairage, l'occupation maximale), dans le cas du confort amélioré cet accroissement n'est pas toléré (DTR.C3-4).
- Pour un séjour de longue durée d'un logement : en situation de confort amélioré : la température sèche est de 24 °C et l'humidité relative est de 45%, pour une situation du confort dit normal : la température sèche est de 27°C et l'humidité relative est de 50% avec un accroissement de température toléré de 2 °C dans les heures de pointe c'est à dire 29 °C.
(Mais pour quelle zone climatique, il faut voir les conditions du confort de la zone, en plus le confort dépend de plusieurs paramètres, quels sont les recommandations nécessaires pour atteindre ce confort).
- Pour les apports à travers les parois opaques et vitrés, l'installation des vitrages antisolaire est recommandée pour réduire les coûts de la climatisation (glaces de forte épaisseur simple ou double, vitrages simples ou doubles équipés de store, de volets, persiennes, de rideau intérieur et extérieur).
- Sur les principes de calcul des apports internes, ils sont considérés constants pendant la durée de fonctionnement et d'installation de la climatisation, (sans hypothèses sur les scénarios d'occupation et le comportement des occupants).
- Pour les gains internes : sont considérés les valeurs de ce document pour : les gains dus aux occupants, les apports calorifiques dus aux différents appareils (appareils ménagers,

machines de bureau.), les gains dus à l'éclairage, les gains dus aux appareils à gaz, les gains par évaporation et d'autres gains produit dans un logement.

3. Tableau des conditions intérieures de base e DTR C3.2 (CNERIB 1997):

Application	Niveau de confort amélioré		Niveau de confort normal		
	Température sèche (°C)	Humidité relative (%)	Température sèche (°C)	Humidité relative (%)	Accroissement toléré de la température (°C)
Séjour de longue durée Logement, hôtel, bureau, hôpital, école, etc	24	45	27	50	2
Séjour de courte durée : magasin, banque, bureau de poste, salon de coiffure, etc	24	45	27	50	2
Séjour de durée limitée avec gains latents important : Amphithéâtre, salle de spectacle, lieu de culte, salle de restauration, cuisine, etc	24	50	27	60	1

1. Le coefficient K de transmission surfacique pour les parois vitrés est calculé par la formule donnée par le DTR C3.2 (CNERIB 1997):

$$\frac{1}{K} = \frac{1}{K_{vn}} + r_v + r_{rid} + r_{occ} \quad [m^2 \cdot ^\circ C/W]$$

K_{vn} (en $W/m^2 \cdot ^\circ C$) représente le coefficient K du vitrage nu ;
 r_v (en $m^2 \cdot ^\circ C/W$) représente la résistance supplémentaire des voilages éventuels ; on adopte $r_v = 0.025 m^2 \cdot ^\circ C/W$;
 r_{rid} (en $m^2 \cdot ^\circ C/W$) représente la résistance supplémentaire des rideaux éventuels ; on adopte $r_{rid} = 0.030 m^2 \cdot ^\circ C/W$;
 r_{occ} (en $m^2 \cdot ^\circ C/W$) représente la résistance supplémentaire des occultations.

2. Les déperditions par renouvellement d'air :

$$D_R = 0.34 * (Q_v + Q_s) \quad [W/^\circ C]$$

Où :

0.34(en $Wh/ m^3 \cdot ^\circ C$) est la chaleur volumique de l'air.
 Q_v (en m^3/h) est le débit spécifique de ventilation.
 Q_s (en m^3/h) est le débit supplémentaire par infiltrations dues au vent.

ANNEXES D : Calcul de la température opérative t_o

Pour calculer la température opérative sur la base de la température radiante et la vitesse de l'air. Sur la section 5.4 et l'annexe A du document "ANSI/ASHRAE Standard 55-2017, Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy" :

$$t_{op} = A t_a + (1 - A) \bar{t}_r$$

D'où : t_o : Température opérative (°C)

t_a : Température moyenne de l'air (°C)

\bar{t}_r : Température moyenne radiante (°C)

La valeur du A peut être sélectionnée en fonction de la vitesse moyenne de l'air :

V _a	<0.2m/s (<40fpm)	0.2 to 0.6m/s (40 to 120 fpm)	0.6 to 1.0m/s (120 to 200 fpm)
A	0.5	0.6	0.7

Pour calculer la température moyenne radiante Tr (°C) voir l'équation:

“Thermal Comfort” chapter of the most current edition of ASHRAE Handbook—Fundamentals.)

$$\bar{T}_r^4 = T_1^4 F_{p_1} + T_2^4 F_{p_2} + \dots + T_N^4 F_{p_N}$$

$$\bar{T}_r = \sqrt[4]{\sum_N (F_{p_N} T_N^4)}$$

Selon ASHRAE 55 sur la section 5.4.2.1 (ASHRAE 2017) : la température moyenne de l'air extérieur dominante doit être déterminée par :

5.4.2.1.1 Elle doit être basée sur pas moins de sept et pas plus de 30 jours consécutifs avant le jour en question.

5.4.2.1.2 Il doit s'agir d'une simple moyenne arithmétique de toutes les températures moyennes quotidiennes de l'air extérieur de tous les jours consécutifs de la section 5.4.2.1 .1

ANNEXES E : Questionnaire d'enquête :

Enquête sur le confort thermique et la consommation énergétique dans les bâtiments résidentiels :

Merci de répondre à ces questions en libre choix.

Information sur l'habitation :

-
2. Etage :
.....
3. Orientation N N/E E S/E S S/O O
 N/O
4. Type de chauffage Individuel Collectif Gaz Electrique Fioul
Bois
5. Type d'Eau chaude Sanitaire : Individuel Collectif Gaz Electrique Fioul
Bois
6. Qui êtes-vous ? (répondant) : H F
(Age) 0 -15 ans 16 - 30 ans 31 - 65 ans
Plus de 66 ans
7. Combien de personnes vivent avec vous ? 0 1 2 3 4 ou +
(Une réponse par ligne)
0-15ans
- 16-30ans
- 31-65ans
- Plus de 66 ans
8. Vous êtes dans l'appartement depuis :
moins de 1 an moins de 2 ans plus de 2 ans
9. Votre statut d'occupation du logement :
Propriétaire Locataire Autre
10. Combien du temps passez-vous dans le logement ? matinée Après midi Toute la journée
nuit
- Dimanche/jeudi
- Vendredi
- Samedi

Ambiance thermique (sensation de chaleur et du froid) :

11. Trouvez-vous l'ambiance thermique de votre logement confortable ? Oui, toute l'année
 Oui, mais...
 Non
12. Savez-vous que le confort thermique est défini par la température, l'humidité, la vitesse de l'air, l'habillement, l'activité métabolique du corps ? Oui Non
13. Comment qualifiez-vous globalement le climat intérieur de votre logement ?
 Supportable Insupportable
14. Comment trouvez-vous le niveau de sécheresse et l'humidité de l'air ?
 Sec humide très humide Ni trop sec ni trop humide
15. Comment trouvez-vous la qualité de l'air? Très fais Frais Etouffant Très étouffant

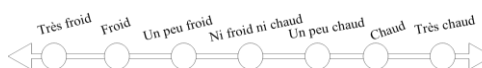
Durant l'Hiver: à l'intérieur de votre logement

16. Comment ressentez-vous l'air ambiant de votre appartement ?



17. En hiver la pièce la plus chaude est :
 Cuisine séjour chambre (1ou 2) salle de bain Je ne sais pas .
18. En hiver la pièce la plus fraîche est :
 Cuisine séjour chambre (1ou 2) salle de bain Je ne sais pas .

Dans la pièce la plus fraîche, avez-vous,
 19. En moyenne :



20. Vous trouvez cela, en moyenne : Supportable Insupportable

Comportement et consommation pour chauffer votre appartement?

21. Possédez-vous un chauffage d'appoint ? Non Oui, dans le hall Oui, dans le séjour
 Oui, dans la cuisine Oui, dans la chambre
22. Si oui, de quel type ? Poêle à gaz Radiateur à bain d'huile Convecteur électrique
 Radiant électrique Soufflant électrique Autre
23. Vous utilisez le chauffage durant les mois : Sep- Oct- Nov- Dec-Jan- Fev- Mars- Avr-Mai
24. Vous utilisez votre chauffage : Toute la journée après midi Pendant la nuit la nuit parfois
25. Trouvez-vous votre système de chauffage est suffisant ? Non Oui Oui (sauf)
26. Le cout du chauffage pour votre appartement est : Très élevé Elevé Raisonnable
27. Ouvrez-vous les fenêtres pour aérer l'appartement ? Oui Non
28. Fermez-vous les volets la nuit ? Oui, dans toutes les pièces Oui, dans toutes les chambres Non
29. Ouvrez-vous les volets le matin pour profiter des apports solaires ? Oui Non
30. Lorsque vous n'êtes pas chez vous, le chauffage est : Fermé en marche baissé en veilleuse
31. A l'intérieur, adaptez-vous votre habillement à la saison ? Oui, je met plus de vêtement au lieu d'augmenter le chauffage
 Non, je préfère d'augmenter le chauffage
 Je ne fais rien de spatial

Durant l'Eté : à l'intérieur de votre logement

32. Comment ressentez-vous l'air ambiant de votre appartement ?



33. En Eté, la pièce la plus fraîche est :
 Cuisine séjour chambre (1ou 2) salle de bain Je ne sais pas .
34. En Eté, la pièce la plus chaude est :
 Cuisine séjour chambre (1ou 2) salle de bain Je ne sais pas .
 Dans la pièce la plus chaude, avez-vous,
35. En moyenne :



36. Vous trouvez cela, en moyenne : Supportable Insupportable

Comportement et consommation pour rafraîchir votre appartement?

37. Possédez-vous un système de climatisation ? *Non* *Oui, dans le hall* *Oui, dans le séjour*
Oui, dans la cuisine *Oui, dans la chambre* ...
38. Si oui, combien de climatiseur possédez-vous dans votre appartement ?
39. Quelle est la puissance du climatiseur ?
40. Vous utilisez le climatiseur durant les mois : *Mai- Juin- Juillet- Aout – Sep*.....
41. Vous utilisez votre climatiseur :
Toute la journée *après midi* *Pendant la nuit* *la nuit parfois*
42. Trouvez-vous votre système de climatisation *est suffisant* ? *Non* *Oui* *Oui (sauf)*
43. Possédez-vous un ventilateur ? *Oui* *Non*
44. Si oui, Améliore-t-il le confort ? *Oui* *Non*
45. Le cout du rafraîchissement pour votre appartement est : *Très élevé* *Elevé* *Raisnable*
46. Ouvrez-vous les fenêtres pour créer un courant d'air ? *Oui* *Non*
47. Si oui, à quel moment ? *le matin* *la journée* *le soir* *la nuit* *quand j'ai chaud*
48. En été avec la fenêtre ouverte, les mouvements d'air sont-ils présents ? *Oui, beaucoup* *Moyennement* *Non*
49. Trouvez-vous cela déranger ? *Oui, beaucoup* *Moyennement* *Non*
50. Fermez-vous les volets ou utilisez-vous des *Non* *Oui, dans toutes les pièces*
Protections solaires pour vous protéger de la chaleur ? *Oui, dans la pièce*

Vous et le bâtiment à haute performance énergétique:(Amélioration souhaitées)

51. La performance énergétique des bâtiments, vous : *Intéresse et vous êtes actifs* *Intéresse* *Intéresse pas*
52. Quelle est ou serait votre motivation pour réduire vos Devoir civique?
 Raisons économiques *Consommation d'énergie* *Protection de l'environnement*
53. Avez-vous reçu un guide pour vous inciter à réduire vos consommations d'énergie ? *Oui* *Non*
54. Si oui, Avez-vous trouvé cela utile ? *Oui* *Non*
Selon vos consommations d'énergie, votre appartement est : *Energivore* *Moyen*
Sobre
55. Quel est la qualité de l'isolation thermique de votre logement ? *Bonne* *Moyen*
faible
(Murs, volets, fenêtres.
56. Quel type d'amélioration vous parait le plus envisageable ? *Isolation des parois* *Fenêtres* *Volets*
(Plusieurs choix sont possibles) *des systèmes (chauffage, rafraîchissement)* *Changement des habitudes*
57. Que pensez-vous du principe du bâtiment à haute performance énergétique *Très bien* *Bien*
Qui vise à diminuer le carbone ? *Moyen* *Mauvais*

Commentaires : Merci de nous faire part des commentaires en relation avec ce questionnaire ou qui vous semble important pour la suite de notre étude

.....
.....



Année Universitaire
2023/2024.

Nom et Prénom : KADI Yasmina

Titre : Evaluation De La Performance Energétique Du Logement
Collectif Dans Les Zones Humides « Cas De La Ville Bejaia Algerie»
These en vue de l'Obtention du Diplôme de Doctorat LMD
En Architecture & Environnement Bâti

Résumé :

Titre : Evaluation de la performance énergétique du logement collectif dans les zones humides « cas de la ville Bejaia Algérie » .

Dans le cadre de la transition énergétique et le défis environnemental mondial, l'amélioration de la performance énergétique des bâtiments est devenue un aspect impératif en architecture et dans l'ingénierie de la construction afin de s'engager aux objectifs du développement durable des bâtiments. Cette thèse s'attache à étudier la performance énergétique et le confort thermique des bâtiments résidentiels dans un climat tempéré chaud méditerranéen, en mettant particulièrement l'accent sur la ville de Bejaia, d'Algérie. Afin d'examiner le degré d'intégration de la Réglementation et Normes national et international visant la performance énergétique. Cette étude a permis de fournir un aperçu clair et explicite de la performance des bâtiments NZEB et des projets pilotes réalisés, conçus comme des laboratoires vivants et modèle référentiel du bâtiment à Énergie Presque Nulle (NZEB) en climat tempéré méditerranéen. L'analyse de ces bâtiments a offert des connaissances concrètes sur les stratégies de haute performance énergétique les plus déterminantes dans le même contexte d'étude. Ce travail de recherche vise à évaluer la performance énergétique et le confort thermique des bâtiments, à travers une série d'analyses ; Tout d'abord, une analyse climatique détaillée de la région de Bejaia a été réalisée, permettant de comprendre les spécificités climatiques locales et d'adapter les stratégies de conception des bâtiments en conséquence. Cette analyse a été complétée par des simulations numériques à l'aide du logiciel TRNSYS, permettant de prédire la consommation énergétique des bâtiments et d'évaluer l'impact de différentes stratégies de conception. Parallèlement, des enquêtes en porte-à-porte ont été menées auprès des résidents pour évaluer leur perception du confort thermique et recueillir des données sur les pratiques de chauffage et de refroidissement, ces données ont été intégrées dans le model de simulation numérique. En outre, des études de cas ont été réalisées sur différents types de bâtiments résidentiels, notamment un logement social conventionnel et une résidence promotionnelle dotée d'une isolation renforcée. Cette approche comparative a permis de mettre en évidence les avantages de l'isolation thermique dans l'amélioration du confort thermique des bâtiments. Les résultats obtenus indiquent que la configuration des parois isolées avec des fibres de bois a un impact positif tant en été qu'en hiver, conduisant à des plages de température intérieure confortables. Les dispositifs d'ombrage et le choix du vitrage se révèlent ainsi d'être les stratégies les plus efficaces. Les résultats confirment que le bâtiment optimisé permet une économie d'énergie d'environ 90 % pour le chauffage et 55 % pour le refroidissement. De plus, il est possible de réduire la consommation énergétique annuelle à 3 kWh/m².a, ce qui représente une diminution de 77 % par rapport au cas conventionnel.

Mots clés : Confort thermique, évaluation de la performance énergétique, Bâtiment résidentiel, NZEB, stratégies passives, Isolation écologique, climat tempéré chaud méditerranéen,

Directeur de these : KORICHI Ammar _ Université Constantine 3 - Salah Boubnider

Année Universitaire : 2023 - 2024
