



Université de Constantine 3
Faculté d'Architecture et d'Urbanisme
Département d'Architecture

**L'UTILISATION DE LA METHODE 'COST-OPTIMALITY'
DANS LA CONCEPTION D'UN BATIMENT COLLECTIF A
NET ZERO ENERGIE SOUS DES SCENARIOS FUTURS DE
CHANGEMENT CLIMATIQUE EN ALGERIE.**

THESE

Présentée pour l'Obtention du Diplôme de Doctorat LMD en
Architecture en Architecture et Environnement

Par
Abdelhakim Walid MAKHLOUFI

Année universitaire
2023/2024



Université de Constantine 3
Faculté d'Architecture et d'Urbanisme
Département d'Architecture

N° de série :

N° d'ordre :

**L'UTILISATION DE LA METHODE 'COST-OPTIMALITY'
DANS LA CONCEPTION D'UN BATIMENT COLLECTIF A
NET ZERO ENERGIE SOUS DES SCENARIOS FUTURS DE
CHANGEMENT CLIMATIQUE EN ALGERIE.**

THESE

Présentée pour l'Obtention du Diplôme de Doctorat LMD en
Architecture en Architecture et Environnement

Par

Abdelhakim Walid MAKHLOUFI

Devant le jury Composé de :

ABDOU Saliha	Président	Professeur	Université Constantine 3
LOUAFI Samira	Directeur	Professeur	Université Constantine 3
ABADA Djallel	Examineur	Docteur	Université Constantine 3
BELGHAR NourEddine	Examineur	Professeur	Université de Khenchla
HAMOUDA Abida	Examineur	Professeur	Université de Batna 1
DJAGHROURI Djamilia	Examineur	Docteure	Université de Biskra

Année universitaire

2023/2024

REMERCIEMENTS

Mes sincères expressions de reconnaissance débutent envers le Créateur, qui nous a gratifiés de l'intelligence nécessaire et a préservé notre santé, facilitant ainsi la conduite fructueuse de cette année d'études.

Je souhaite également exprimer ma profonde gratitude envers mon encadrante, Pr. Louafî Samira, dont la patience, la disponibilité et les conseils éclairés ont grandement enrichi mes réflexions.

Mes remerciements s'étendent également à la directrice Pr. Outtas Saliha et aux membres éminents du laboratoire ABE pour leur assistance inestimable.

Un hommage particulier est dû aux éminents professeurs du département d'architecture de Constantine, dont les enseignements ont constitué les instruments essentiels de mon succès tout au long de mon parcours universitaire.

J'adresse également mes chaleureux remerciements aux membres éminents du Comité de Formation Doctorale (CFD), dont la contribution a été d'une importance cruciale tout au long de cette expérience académique.

Un remerciement spécial est également adressé au Pr. Shaddy Attia pour son appui déterminant dans l'accomplissement de ce travail de recherche.

Je n'omet pas de saluer les membres du jury, dont la bienveillance a honoré l'évaluation de ce travail académique.

Je tiens à exprimer ma gratitude envers l'Icam pour avoir facilité et soutenu la réalisation de mon stage au sein de leur institution

Ma gratitude sincère est réservée à ma famille, en particulier à mon père et à ma mère, dont les conseils éclairés et le soutien inébranlable ont rendu possible la réalisation de mes ambitions académiques, y compris la rédaction de cette thèse.

Je tiens également à exprimer ma reconnaissance envers mes amis et collègues, dont le soutien moral et intellectuel a été un pilier essentiel tout au long de notre parcours académique commun.

DEDICACES

Je dédie ce travail...

À toute ma famille...

Aux amis...

Qui m'ont toujours soutenu et encouragé.

TABLE DES MATIERES

REMERCIEMENTS

DEDICACES

LISTE DES FIGURES..... vii

LISTE DES TABLEAUX xii

LISTE DES ABREVIATIONS..... xvi

RESUME

ABSTRACT

ملخص

CHAPITRE - I - INTRODUCTION GENERALE

Introduction.....	2
1. Problematique.....	4
2. Questionnements.....	6
2.1. Principal	6
2.2. Secondaire.....	7
3. Hypothèses	7
4. But et objectifs	7
4.1. But.....	7
4.2. Objectifs.....	7
5. Méthodologie	7
5.1. Définition du concept de base et Questionnaire (État de l'art et Enquête) ..	7
5.2. Définition des bâtiments de référence et des climats d'étude (Collecte et traitement des données).....	8
5.3. Définition des variables de conception (Collecte et traitement des données)	8
5.4. Mesure sur le terrain de la température et de l'humidité.....	9
5.5. Optimisation énergétique et financière (Développement d'instruments et Application).....	9
5.6. Scénarios RCP et futurs scénarios de changement climatique (Développement d'instruments, Application et Projections).....	9
5.7. Recommandations et exigences minimales futures pour les bâtiments résidentiels	10
6. Plan du manuscrit.....	12

CHAPITRE - II - BATIMENT NET ZERO ENERGIE : ENTRE DEFINITION, STRATEGIE ET COUTS

Introduction.....	14
1. Définition Approfondie de la Net Zéro Énergie.....	15
1.1. ZEH – Maison Zéro Energie.....	15
1.2. NZE – Bâtiments Net Zéro Energie.....	16
1.3. Évolution du concept et du cadre légal de la NZE	19
2. Les différentes catégories de la NZE	20
2.1. Net Zéro énergie	20
2.1.1. Net Zéro Site	20
2.1.2. Net Zéro Source	21
2.2. Net Zéro Coût	21
2.3. Net Zéro Emissions.....	22

2.4.	Net Zéro Exergie.....	23
2.5.	Avantages et désavantages des différentes catégories.....	24
3.	Métrie de la NZE.....	25
3.1.	Limite du système du bâtiment NZE.....	25
3.2.	Equilibrage et choix des données de la définition de la NZE.....	26
3.3.	Synergie avec le réseau.....	27
3.4.	Procédure de suivi.....	27
4.	Hiérarchie des énergies renouvelables.....	29
5.	Les stratégies de la NZE ‘Les étapes pour y parvenir’.....	30
6.	Indices de la NZEB.....	35
6.1.	Indices de performance Zéro énergie (zEPI).....	35
6.2.	Indice HERS.....	36
7.	Cout et Net zéro énergie.....	37
7.1.	Analyse financière.....	38
7.1.1.	Retour sur investissement (ROI).....	38
7.1.2.	Valeur Nette Actuelle (NPV).....	39
7.1.3.	Analyse du coût du cycle de vie (LCC).....	40
7.1.1.	Couts liés à l’énergie.....	41
7.1.2.	Valeur temporelle de l'argent.....	41
8.	Adaptation de la définition.....	42
	Conclusion.....	45

CHAPITRE - III - LE BATIMENT RESIDENTIEL ALGERIEN AU CŒUR DE LA TRANSITION ENERGETIQUE

	Introduction.....	47
1.	Les bases de l’énergie.....	49
1.1.	Définition de l’énergie.....	49
1.2.	Quantifier l'utilisation de l'énergie dans les bâtiments.....	50
1.2.1.	Energie du site.....	50
1.2.2.	Energie source/primaire.....	50
1.3.	Énergie et carbone.....	50
1.4.	Intensité de la consommation énergétique.....	51
1.4.1.	Énergie et type de bâtiment.....	51
1.5.	Physique énergétique du bâtiment.....	52
1.5.1.	Science de la conception.....	52
1.5.2.	Le bilan énergétique.....	52
1.5.3.	Propriétés du flux thermique des matériaux.....	53
1.5.4.	Ponts thermiques.....	54
1.5.5.	Charges thermiques externes : Rayonnement solaire.....	54
1.5.6.	Charges thermiques internes.....	55
1.6.	Unités d'énergie et facteurs de conversion.....	56
1.6.1.	Unités d'énergie et de puissance.....	56
2.	Contexte énergétique en Algérie.....	57
2.1.	Production d'énergie.....	57
2.2.	Réserves.....	58
2.2.1.	Pétrole.....	58
2.2.1.	Gaz naturel.....	59

2.2.2.	Consommation d'énergie primaire et finale :	60
2.2.3.	Consommation finale d'énergie du secteur résidentiel.....	61
2.2.4.	L'évolution des coûts énergétiques résidentiels de 1994 à 2023.....	61
3.	Energies renouvelables.....	62
3.1.	Potentiel des énergies renouvelables	62
3.1.1.	Potentiel solaire	62
3.1.2.	Potentiel éolien.....	63
3.1.3.	Potentiel en géothermie.....	64
3.1.4.	Potentiel en biomasse.....	65
3.1.5.	Potentiel en hydro-électrique	65
4.	Parc de logements.....	66
5.	Politique d'efficacité énergétique en Algérie.....	68
5.1.	Cadre réglementaire et incitatif.....	68
5.2.	Cadre institutionnel.....	69
5.3.	Secteur du bâtiment	70
5.3.1.	Evaluation de la situation actuelle.....	70
5.3.2.	Méthodologie à suivre Dans le secteur du bâtiment	71
5.3.3.	Les mesures indispensables pour promouvoir l'efficacité énergétique..	71
5.3.4.	Normes d'efficacité énergétique pour les constructions neuves.....	72
5.3.5.	Nouveaux instruments à mettre en place.....	73
6.	Energie et environnement.....	73
6.1.	Les émission CO2e de l'Algérie	73
6.2.	Réduction des émissions de CO2e en Algérie	74
7.	Niveau de connaissance et de sensibilisation des professionnels à la NZE (Questionnaire)	75
7.1.	Le questionnaire.....	75
7.2.	Information générale :.....	77
7.3.	Changements climatiques et réchauffement planétaire.....	79
7.4.	Efficacité énergétique et consommation énergétique des bâtiments	80
7.5.	Les énergies renouvelables	81
7.6.	La net zéro énergie.....	83
	Conclusion	85

CHAPITRE -IV- METHODOLOGIE D'OPTIMISATION MULTICRITERES ET 'COST-OPTIMALITY' DE LA NET ZERO ENERGIE

	Introduction.....	88
1.	Méthodologie de l'optimisation des coûts	90
1.1.	Processus de mise en œuvre de l'optimisation des coûts	91
1.1.1.	Définition du bâtiment de référence.....	91
1.1.2.	Sélection des mesures d'efficacité énergétique	91
1.1.3.	Calcul de la consommation d'énergie.....	91
1.1.4.	Calcul du coût.....	92
1.1.5.	La 'Cost-optimality'	92
2.	Méthodologie d'optimisation des performances des bâtiments.....	93
2.1.	Optimisation et Simulation des performances des bâtiments	94
2.2.	Simulation de la performance des bâtiments (BPS)	94

2.3.	L'optimisation de la performance des bâtiments (BPO)	95
3.	Optimisation multi-objectifs de l'optimalité des coûts	96
3.1.	Le problème d'optimisation	98
3.1.1.	Consommation d'énergie du site (Première fonction)	98
3.1.2.	Coût du cycle de vie et Coûts liés à l'énergie (Deuxième fonction)	98
3.2.	Optimisation Multi-étapes (Multi-phasage).....	99
3.2.1.	Utilisation de la méthode d'optimisation en plusieurs étapes.....	99
3.3.	Ligne de Pareto	100
4.	Résumé de la méthodologie	101
4.1.	Définition des bâtiments de référence.....	101
4.2.	Définition des variables de conception	102
4.3.	Optimisation énergétique	102
4.4.	Optimisation économique	102
4.5.	Optimum économique : Aperçu de la performance énergétique et financière des paquets de mesures (développement et application des instruments). 103	
4.6.	Recommandations pour les architectes et futures exigences minimales pour les bâtiments résidentiels.....	103
5.	Description du bâtiment étudié	105
6.	Mesure sur site du cas d'études.....	107
7.	BEopt : Outil de simulation et d'optimisation énergétique des bâtiments	108
8.	Caractéristiques du modèle de simulation.....	110
9.	Paramètres d'occupation et de fonctionnement	110
10.	Calibration et validation du modèle de simulation.....	111
	Conclusion	113

CHAPITRE -V- OPTIMISATION DES PARAMETRES PASSIFS DU BATIMENT

	Introduction.....	115
1.	Les stratégies passives.....	116
1.1.	Orientations.....	116
1.2.	Effet inter-bâtiments	121
1.3.	Valeur U.....	126
1.3.1.	Les assemblages de mur	127
1.3.2.	Les assemblages de dalle.....	132
1.3.3.	Isolation des dalles	136
1.4.	Type de fenêtre	139
1.5.	WWR	144
1.6.	Auvents	149
1.7.	Etanchéité a l'air	153
1.8.	Ventilation naturelle	157
	Conclusion	162

CHAPITRE -VI- STRATEGIES ACTIVE ET ENR DE LA NET ZERO ENERGIE

	Introduction.....	165
1.	Les stratégies actives.....	166
1.1.	Chauffage, ventilation et climatisation (CVC)	166
1.1.1.	Climatisation centrale.....	167
1.1.2.	Climatisation simple.....	169
1.1.3.	Pompe à chaleur	171

1.1.4.	Chaudière	174
1.2.	Eclairage artificiel	176
1.3.	Eau chaude sanitaire	178
1.3.1.	Réseaux de distribution (tuyaux).....	180
1.4.	Equipements économes en énergie	181
1.4.1.	Les taux et la charge d'utilisation des équipements	185
2.	Energie renouvelable : Panneaux photovoltaïque	186
2.1.	Orientation et inclinaison	186
2.2.	Dimensionnement de la puissance	190
	Conclusion	192

CHAPITRE - VI - LE BATIMENT A NET ZERO ÉNERGIE FACE AUX SCENARIOS RCP : UN CHEMIN VERS UNE ARCHITECTURE DURABLE ET RESILIENTE

	Introduction.....	195
1.	Fondements Climatiques	197
1.1.	Définition et Caractérisation du Climat	197
1.2.	Analyse climatique	200
1.3.	Changement climatique	201
1.4.	Prévision et projection climatique	202
1.4.1.	Fondements des projections	202
1.4.2.	Voies de concentration représentatives 'RCP'	202
2.	Simulation du cas d'étude avec RCP	205
2.1.	Cas du climat de Constantine.....	205
2.2.	Cas du climat d'Alger	206
2.3.	Cas du climat de Ghardaïa	206
3.	Intégration des stratégies passives avec différents RCP	207
3.1.	Cas du climat de Constantine.....	207
3.2.	Cas du climat d'Alger	208
3.3.	Cas du climat de Ghardaïa	209
4.	Intégration des stratégies actives avec différents RCP.....	209
4.1.	Cas du climat de Constantine.....	210
4.2.	Cas du climat d'Alger	210
4.3.	Cas du climat de Ghardaïa	211
5.	Intégration des Énergies Renouvelables avec différents RCP	212
5.1.	Cas du climat de Constantine.....	212
5.2.	Cas du climat d'Alger	213
5.3.	Cas du climat de Ghardaïa	214
6.	Simulation du bâtiment a net zéro énergie	214
6.1.	Cas du climat de Constantine.....	217
6.2.	Cas du climat d'Alger	218
6.3.	Cas du climat de Ghardaïa	219
	Conclusion	220

CHAPITRE -VII- CONCLUSION GENERALE

Conclusion	228
BIBLIOGRAPHIE	233
ANNEXES	248
Annexe A : Questionnaire.....	249
Annexe B : Article publié	252

LISTE DES FIGURES

Figure 1.1 Résumé de la méthodologie	11
Figure 2.1 Graphe représentant l'équilibre de la NZE	16
Figure 2.2 Résumé des différentes stratégies pour atteindre la net zéro énergie.....	35
Figure 2.3 Échelle zEPI vers NZE.....	36
Figure 2.4 L'échelle de notation du HERS.....	37
Figure 2.5 Résumé de la définition de la NZE	43
Figure 2.6 Exemple d'adaptions de la définition avec un système de points.....	44
Figure 3.1 schéma expliquant l'énergie source et site	50
Figure 3.2 Charges d'énergie thermique dans les bâtiments.....	52
Figure 3.3 Structure de la production commerciale d'énergie primaire	57
Figure 3.4 Structure des pertes d'énergie.....	58
Figure 3.5 Structure de la consommation nationale par forme d'énergie	60
Figure 3.6 Carte d'irradiations solaires en kWh/m ² /an.....	62
Figure 3.7 Carte de la vitesse du vent en m/s	63
Figure 3.8 Carte des ressources géothermiques.....	64
Figure 3.9 Tranche d'âge de l'échantillon étudié.	77
Figure 3.10 Niveau d'éducation de l'échantillon étudié.....	78
Figure 3.11 Niveau de préoccupation au changement climatique actuels.....	79
Figure 3.12 L'effet du secteur du bâtiment sur le changement climatique	79
Figure 3.13 Niveau de connaissances en matière d'efficacité énergétique.....	80
Figure 3.14 Motivation pour réduire la consommation énergétique de leurs projets.....	81
Figure 3.15 Niveau de connaissances des professionnels en matière d'énergies renouvelables	82
Figure 3.16 niveau de connaissance sur la net zéro énergie	83
Figure 3.17 La part de responsabilité de chacun des acteurs.....	83
Figure 3.18 Envie de participation aux décisions future	84
Figure 4.1 Courbe de coût et d'optimum économique de différentes stratégies.....	92
Figure 4.2 Statistique du nombre d'études effectuer avec différents BPS.....	94
Figure 4.3 Statistique du nombre d'études effectué avec différents BPO	95
Figure 4.4 Les objectives considéré pour les études NZE.....	97
Figure 4.5 Exemple de ligne de Pareto	101
Figure 4.6 Méthodologie utiliser	104

Figure 4.7 Bâtiment cas d'étude (Plan, façade, plan de masse)	106
Figure 4.8 Appareil de mesure PCE-HT 71N.....	108
Figure 4.9 Appareil de mesure delta OHM HD32.3.....	108
Figure 4.10 Différentes fenêtres du logiciel BEopt	109
Figure 5.1 Effets des variations d'orientations sur l'optimalité de la consommation énergétique et du cout.....	118
Figure 5.2 Effets des variations d'orientations sur les résultats des émissions de CO2e..	119
Figure 5.3 Effets des variations d'orientations sur les résultats de consommation finale d'énergie (Appartement 03)	120
Figure 5.4 Effets des variations des distance sur l'optimalité de la consommation énergétique et du cout.....	122
Figure 5.5 Effets des variations de distance sur les résultats des émissions de CO2e (%/an)	123
Figure 5.6 Effets des variations d'orientations sur les résultats de consommation finale d'énergie (Appartement 03)	125
Figure 5.7 Effets des variations de mur sur l'optimalité de la consommation énergétique et du cout	128
Figure 5.8 Effets des variations des murs sur les résultats des émissions de CO2e (%/an)	129
Figure 5.9 Effets des variations des murs sur les résultats de consommation finale d'énergie (Appartement 03)	131
Figure 5.10 Effets des variations de dalle sur l'optimalité de la consommation énergétique et du cout.	133
Figure 5.11 Effets des variations de dalles sur les résultats des émissions de CO2e (%/an)	134
Figure 5.12 Effets des variations d'orientations sur les résultats de consommation finale d'énergie (Appartement 03)	135
Figure 5.13 Economie sur la consommation énergie site pour l'isolation de la dalle (sol) (kWh/m ² /an)	137
Figure 5.14 Economie sur la consommation énergie site pour l'isolation de la dalle (plafond)	138
Figure 5.15 Effets des variations des types de fenêtres sur l'optimalité de la consommation énergétique et du cout.....	140

Figure 5.16 Effets des variations des types de fenêtres d'orientations sur les résultats des émissions de CO ₂ e (%/an)	141
Figure 5.17 Effets des variations des types de fenêtres s sur les résultats de consommation finale d'énergie (Appartement 03)	143
Figure 5.18 Effets des variations d'orientations sur l'optimalité de la consommation énergétique et du cout.....	145
Figure 5.19 Effets des variations du WWR sur les résultats des émissions de CO ₂ e (%/an)	146
Figure 5.20 Effets des variations du WWR sur les résultats de consommation finale d'énergie (Appartement 03)	148
Figure 5.21 Effets des variations des longueurs d'auvents sur l'optimalité de la consommation énergétique et du cout	150
Figure 5.22 Effets des variations des longueurs d'auvents sur les résultats des émissions de CO ₂ e (%/an).....	150
Figure 5.23 Effets des variations des longueurs d'auvents sur les résultats de consommation finale d'énergie (Appartement 03)	152
Figure 5.24 Effets des variations de l'étanchéité à l'air sur l'optimalité de la consommation énergétique et du cout.....	154
Figure 5.25 Effets des variations de l'étanchéité à l'air sur les résultats des émissions de CO ₂ e (%/an).....	155
Figure 5.26 Effets des variations de l'étanchéité à l'air sur les résultats de consommation finale d'énergie (Appartement 03)	156
Figure 5.27 Effets des variations la ventilation naturelle sur l'optimalité de la consommation énergétique et du cout	158
Figure 5.28 Effets des variations la ventilation naturelle sur les résultats des émissions de CO ₂ e (%/an).....	159
Figure 5.29 Effets des variations de la ventilation naturelle sur les résultats de consommation finale d'énergie (Appartement 03)	160
Figure 6.1 Effets des variations de climatisation centrale sur l'optimalité de la consommation énergétique et du cout	168
Figure 6.2 Effets des variations de climatisations centrales sur les résultats des émissions de CO ₂ e (%/an)	169
Figure 6.3 Effets des variations de climatiseur sur l'optimalité de la consommation énergétique et du cout.....	170

Figure 6.4 Effets des variations de climatiseurs sur les résultats des émissions de CO2e (%/an)	171
Figure 6.5 Effets des variations de pompe a chaleurs sur l'optimalité de la consommation énergétique et du cout.....	173
Figure 6.6 Effets des variations de la pompe a chaleur sur les résultats des émissions de CO2e (%/an).....	173
Figure 6.7 Effets des variations du système de distribution des chaudières sur l'optimalité de la consommation énergétique et du cout	175
Figure 6.8 Effets des variations du système de distribution des chaudières sur les résultats des émissions de CO2e (%/an)	175
Figure 6.9 Effets des variations dans l'éclairage artificiel sur l'optimalité de la consommation énergétique et du cout	177
Figure 6.10 Effets des variations l'éclairage artificiel sur l'optimalité de la consommation énergétique et du cout.....	178
Figure 6.11 Effets des variations de chauffe-eau sur l'optimalité de la consommation énergétique et du cout.....	179
Figure 6.12 Effets des variations de chauffe-eau sur l'optimalité de la consommation énergétique et du cout.....	180
Figure 6.13 Effets des variations de tuyaux de distribution sur l'optimalité de la consommation énergétique et du cout	181
Figure 6.14 Effets des variations d'équipements énergétiquement efficaces sur l'optimalité de la consommation énergétique et du cout	183
Figure 6.15 Effets des variations des autres équipements sur l'optimalité de la consommation énergétique et du cout	184
Figure 6.16 Effets des variations des taux d'utilisation des équipements sur l'optimalité de la consommation énergétique et du cout	186
Figure 6.17 Effets des variations d'orientation et d'inclinaison des panneaux solaires sur l'optimalité de la consommation énergétique et du cout.....	188
Figure 6.18 Effets des variations d'orientation et d'inclinaison des panneaux solaires sur les résultats des émissions de CO2e (%/an)	189
Figure 7.1 Carte de classification de climat par Koppen.....	198
Figure 7.2 Carte de classification climatique Algérienne de Koppen et Geiger	199
Figure 7.3 La carte climatique algérienne, conforme à l'ancien DTR 1998.....	200
Figure 7.4 Les scénarios RCP (trajectoire du forçage radiatif jusqu'à l'horizon 2100)	203

Figure 7.5 Consommation des bâtiments cas d'étude et leurs transformations vers la NZE	215
Figure 8.0.1 Feuille de route de la durabilité des bâtiments.....	231

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 2.1 Exigences en matière énergétique de certains pays européens.....	18
Tableau 2.2 exemples des critères traités par les différentes organisations de certains pays européens et américains.....	20
Tableau 2.3 Les différentes définitions et leurs caractéristiques.....	24
Tableau 2.4 différentes approches utilisées dans le calcul du bilan d'énergie net zéro.....	28
Tableau 2.5 Indicateurs essentiels pour définir les bâtiments à énergie zéro.....	29
Tableau 2.6 Synthèse de classes de hiérarchie des énergies renouvelables	30
Tableau 2.7 Les stratégies de la NZE étudiées par les différents chercheurs.....	31
Tableau 2.8 Principaux indicateurs financiers de la NZE	38
Tableau 3.1 Unité de conversion principale	49
Tableau 3.2 Statistiques des émissions de gaz à effet de serre pour le monde entier et en Algérie	51
Tableau 3.3 Propriétés du flux thermique des matériaux	53
Tableau 3.4 Exemples de matériaux avec leurs propriétés thermiques.....	54
Tableau 3.5 Les différents type de source de gain de chaleur.....	55
Tableau 3.6 Les unités SI et non SI pour l'énergie et la puissance.....	56
Tableau 3.7 Rendement de production d'électricité à travers d'autre énergies	57
Tableau 3.8 Total des réserves prouvées de pétrole	59
Tableau 3.9 Total des réserves prouvées de gaz.....	60
Tableau 3.10 Répartition des logements habités selon le type de construction	66
Tableau 3.11 Structure des logements habités disposant de commodités	67
Tableau 3.12 Répartition du parc logement selon la wilaya de résidence,.....	68
Tableau 3.13 Politique d'efficacité énergétique en Algérie	69
Tableau 3.14 les efforts des différents acteurs qui visent à promouvoir l'efficacité énergétique en Algérie.....	70
Tableau 3.15 IEA Policy Pathway "Programmes d'efficacité énergétique"	71
Tableau 3.16 Instruments à mettre en place	73
Tableau 3.17 Émissions d'équivalent dioxyde de carbone provenant de l'énergie, des émissions de processus, du méthane et du brûlage en millions de tonnes d'équivalent dioxyde de carbone.....	74
Tableau 3.18 récapitulatif des émissions de CO _{2e} à éviter à l'horizon 2030 en millions de tonnes CO ₂	75
Tableau 4.1 Caractéristiques du modèle de simulation	110

Tableau 4.2 Paramètres d'occupation et de fonctionnement	111
Tableau 4.3 Calibration et validation du modèle de simulation.....	112
Tableau 5.1 Configurations d'orientation et leurs retours sur investissements	117
Tableau 5.2 Variantes des distances entre bâtiments et leurs retours sur investissement. 122	
Tableau 5.3 Variantes des types de murs et leurs retours sur investissement.	127
Tableau 5.4 Variantes des dalles et leurs retours sur investissement.	133
Tableau 5.5 Variantes des isolations de dalles et leurs retours sur investissement.....	136
Tableau 5.6 Compilation des isolants potentiels qui peuvent être appliqués pour l'isolation des plafonds	137
Tableau 5.7 Variantes des isolations de dalles et leurs retours sur investissement.....	139
Tableau 5.8 Variantes des WWR et leurs retours sur investissement.	145
Tableau 5.9 Variantes des auvents et leurs retours sur investissement.	149
Tableau 5.10 Variantes d'étanchéité et leurs retours sur investissement.	153
Tableau 5.11 Variantes de la ventilation naturels et leurs retours sur investissement.	158
Tableau 5.12 Résultats optimaux découlant des différentes stratégies envisagées.	162
Tableau 6.1 Variantes de la climatisation centrale et leurs retours sur investissement....	167
Tableau 6.2 Variantes des systèmes de climatisation split et leurs retours sur investissement.....	170
Tableau 6.3 Variantes des pompes a chaleurs disponibles et leurs retours sur investissement.....	172
Tableau 6.4 Variantes des systèmes de distribution des chaudières et leurs retours sur investissement.....	174
Tableau 6.5 Variantes des types d'éclairage les plus utilisés et leurs retours sur investissement.....	176
Tableau 6.6 Variantes des chauffe-eaux et leurs retours sur investissement.	179
Tableau 6.7 Variantes des réseaux de distribution et leurs retours sur investissement... 181	
Tableau 6.8 Variantes des équipements économes en énergie et leurs retours sur investissement.....	182
Tableau 6.9 Variantes des Taux d'utilisation des équipements et leurs retours sur investissement.....	185
Tableau 6.10 Variantes de l'orientation et inclinaison des panneaux solaire et leurs consommations énergétique, cout et réduction de CO2e	187
Tableau 6.11 Variantes de la puissance des panneaux solaire et leurs retours sur investissement.....	190

Tableau 6.12 Effets des variations de la puissance des panneaux solaire sur la consommation énergétique et la réduction de CO ₂ e	191
Tableau 6.13 Résultats optimaux découlant des différentes stratégies Active et EnR envisagées	192
Tableau 7.1 Forçages radiatifs (W/m ²) des RCP et leurs équivalents CO ₂ e atmosphérique	204
Tableau 7.2 Projection de l'évolution de la température moyenne à la surface du globe et de l'élévation moyenne du niveau de la mer au milieu et à la fin du XXI ^e siècle.....	204
Tableau 7.3 Résultat des simulations du cas d'étude du climat de Constantine avec les différents RCP.	205
Tableau 7.4 Résultat des simulations du cas d'étude du climat d'Alger avec les différents RCP.....	206
Tableau 7.5 Résultat des simulations du cas d'étude du climat de Ghardaïa avec les différents RCP.	207
Tableau 7.6 Résultat des simulations du cas d'étude avec les cas optimaux des stratégies passive du climat de Constantine avec les différents RCP.....	208
Tableau 7.7 Résultat des simulations du cas d'étude avec les cas optimaux des stratégies passive du climat d'Alger avec les différents RCP.	208
Tableau 7.8 Résultat des simulations du cas d'étude avec les cas optimaux des stratégies passive du climat de Ghardaïa avec les différents RCP.	209
Tableau 7.9 Résultat des simulations du cas d'étude avec les cas optimaux des stratégies active du climat de Constantine avec les différents RCP.	210
Tableau 7.10 Résultat des simulations du cas d'étude avec les cas optimaux des stratégies active du climat d'Alger avec les différents RCP.....	211
Tableau 7.11 Résultat des simulations du cas d'étude avec les cas optimaux des stratégies active du climat de Ghardaïa avec les différents RCP.....	212
Tableau 7.12 Résultat des simulations du cas d'étude avec les cas optimaux des stratégies EnR du climat de Constantine avec les différents RCP.....	213
Tableau 7.13 Résultat des simulations du cas d'étude avec les cas optimaux des stratégies EnR du climat d'Alger avec les différents RCP.	213
Tableau 7.14 Résultat des simulations du cas d'étude avec les cas optimaux des stratégies EnR du climat de Ghardaïa avec les différents RCP.	214
Tableau 7.15 Résultats du cas d'exemple de Constantine en étape par étape.....	216

Tableau 7.16 Résultat des simulations du cas d'étude avec les cas optimaux de la net zéro énergie du climat de Constantine avec les différents RCP.....	218
Tableau 7.17 Résultat des simulations du cas d'étude avec les cas optimaux de la net zéro énergie du climat d'Alger avec les différents RCP.	218
Tableau 7.18 Résultat des simulations du cas d'étude avec les cas optimaux de la net zéro énergie du climat de Ghardaïa avec les différents RCP.	219
Tableau 7.19 Résumé des résultats des simulations du cas d'étude avec les différents RCP de chaque climat.	221
Tableau 7.20 Résumé des résultats de simulation du cas d'étude avec les cas optimaux des stratégies passives de chaque climat avec les différents RCP.....	222
Tableau 7.21 Résumé des résultats de simulation du cas d'étude avec les cas optimaux des stratégies actives de chaque climat avec les différents RCP.	223
Tableau 7.22 Résumé des résultats de simulation du cas d'étude avec les cas optimaux des stratégies EnR de chaque climat avec les différents RCP.	224
Tableau 7.23 Résumé des résultats de simulation du cas d'étude avec les cas optimaux de la NZE de chaque climat avec les différents RCP.....	225
Tableau A0.1 Questionnaire.....	249

LISTE DES ABREVIATIONS

ACH : Air Changes per Hour.

AIE : Agence Internationale de l'Énergie.

APRUE : Agence pour la Promotion et la Rationalisation de l'Utilisation de l'Énergie.

AR5 : Fifth Assessment Report.

ASHRAE : American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers.

BBC : Bâtiments à Basse Consommation d'Énergie.

BEPOS : Bâtiments à Énergie Neutre ou Positive.

BET : Bureaux d'Études Techniques.

BPO : Building Performance Optimisation.

BPS : Building Performance Simulation..

CEREFÉ : Commissariat aux Énergies Renouvelables et à l'Efficacité Énergétique.

CNERIB : Centre National d'Études et de Recherches Intégrées du Bâtiment.

CO² : Dioxyde de carbone.

COP : Conference of the Parties.

CV(RMSE) : Coefficient of Variation of Root Mean Square Error.

CVC : Chauffage, la Ventilation et la Climatisation.

DOE : U.S. Department of Energy.

DTR : Document Technique Réglementaire.

EEM : Energy Efficiency Measures.

ECBCS : Energy Conservation in Buildings and Community Systems.

EPBD : Energy Performance of Buildings Directive.

EISA : Energy Independence and Security Act.

EnR : Énergies Renouvelables.

ERC : Energy-Related Costs.

FNMEERC : Fonds National pour la Maîtrise de l'Énergie pour les Énergies Renouvelables et de la Cogénération.

GES : Gaz à Effet de Serre.

GIEC : Groupe d'Experts Intergouvernemental sur l'Évolution du Climat.

HERS : Home Energy Rating System.

HVAC : Heating, Ventilation, and Air Conditioning.

IANOR : Institut Algérien de Normalisation.

ICF : Insulated Concrete Forms.

SIP : Structural Insulated Panel

IPCC : Intergovernmental Panel on Climate Change.

LCA : Life Cycle Assessment.

LCC : Life Cycle Cost.

LED : Light Emitting Diode.

LEED : Leadership in Energy and Environmental Design.

MENA : Middle East and North Africa.

MBE : Mean Bias Error.

MTEP : Millions de Tonnes d'Équivalent Pétrole.

MTEER : Ministère de la Transition Énergétique et des Énergies Renouvelables.

NREL : National Renewable Energy Laboratory.

NPV : Net Present Value.

NZEB : Net Zero Energy in the Building.

NZEH : Net Zero Energy Homes/Houses.

NZE : Net Zéro Énergie.

ODD : Objectifs de Développement Durable.

ONS : Office National des Statistiques

PAC : Pompe à chaleur.

PCM : Phase Change Material.

PEX : Cross-Linked Polyethylene.

PNME : Programme National de Maîtrise de l'Énergie.

PNUE : Programme des Nations Unies pour l'Environnement.

PV : Photovoltaïque.

ROI : Return on Investment.

RCP : Representative Concentration Pathways.

RMSE : Root Mean Square Error.

SEC : Site Energy Consumption.

SEER : Seasonal Energy Efficiency Ratio.

SI : Système International d'Unités.

SP : Stratégies passives.

ST : Solar Thermal.

UE : Union Européenne.

UDI : Useful Daylight Illuminance.

WT: Wind Turbine.

WWR : Window to wall ratios..

zEPI : Zero Energy Performance Index.

RESUME

Dans le contexte de l'accélération du changement climatique et des impératifs inhérents à la pratique architecturale durable, il convient de souligner que le secteur résidentiel demeure l'un des principaux postes de consommation énergétique, avec les conceptions standardisées qui prédominent, souvent au détriment des mesures d'efficacité énergétique et en négligeant les particularités climatiques locales. Cette tendance conduit ainsi à une représentation dépassant un tiers de la consommation énergétique totale à l'échelle mondiale et nationale. Par conséquent, il devient impératif d'adopter une approche stratégique et proactive en vue de favoriser des pratiques de construction plus durables et écoénergétiques.

Cette étude s'engage à élaborer une méthodologie fondée sur l'approche de la "Cost-Optimality" en vue d'atteindre la Net Zéro Énergie dans les bâtiments collectifs algériens. Cette démarche intègre diverses stratégies, tant passives qu'actives, ainsi que l'utilisation d'énergies renouvelables. Cette intégration est facilitée par une approche quantitative, exploitant une revue exhaustive de la littérature sur l'énergie Net Zéro, un questionnaire évaluant le niveau de connaissance des professionnels du domaine, des mesures sur site de l'étude de cas, et l'utilisation de modèles et de simulations numériques. L'étude est conduite dans trois zones climatiques distinctes, à savoir le climat semi-aride de Constantine, le climat méditerranéen d'Alger et le climat aride de Ghardaïa. De plus, elle tient compte de trois scénarios futurs de changement climatique (RCP 2.6, 4.5, 8.5).

Les résultats finaux mettent en évidence le rôle central joué par les bâtiments Net Zéro Énergie dans l'atténuation de l'impact du secteur du bâtiment sur les défis liés à la transition énergétique et au changement climatique. Ainsi, l'application de la méthodologie de la "Cost-Optimality" pour parvenir à la Net Zéro Énergie dans les bâtiments résidentiels collectifs se révèle être une approche pragmatique et viable vers un environnement plus écologique et résilient. Grâce à l'adoption de stratégies diversifiées, il devient possible de créer un environnement bâti qui non seulement réduit la consommation énergétique, mais atténue également les émissions de gaz à effet de serre. Malgré des investissements initialement plus élevés, la viabilité incontestable de ces bâtiments Net Zéro Énergie est affirmée, en particulier lors de la considération des divers scénarios de concentration représentatifs. Cela souligne l'importance cruciale d'accorder la priorité à la Net Zéro Énergie en tant qu'élément central des initiatives de lutte contre le changement climatique.

Mots clés : Net zéro énergie, Efficacité énergétique, Cost-optimality, Bâtiments résidentiels durable, Changement climatique.

ABSTRACT

In the context of the accelerating climate change and the inherent imperatives of sustainable architectural practices, it is pertinent to emphasise that the residential sector remains one of the primary consumers of energy. With prevailing standardised designs often overlooking energy efficiency measures and disregarding local climatic peculiarities, this trend leads to a representation exceeding one-third of the total global and national energy consumption. Consequently, it becomes imperative to adopt a strategic and proactive approach to promote more sustainable and energy-efficient construction practices.

This study commits to developing a methodology based on the "Cost-Optimality" approach to achieve Net Zero Energy in collective Algerian residential buildings. This approach integrates various passive and active strategies, along with the utilisation of renewable energies. Facilitated by a quantitative approach, leveraging a comprehensive review of the literature on Net Zero Energy, a survey assessing the knowledge level of industry professionals, on-site measurements of case studies, and the use of numerical models and simulations. Conducted in three distinct climatic zones, namely the semi-arid climate of Constantine, the Mediterranean climate of Algiers, and the arid climate of Ghardaïa. Additionally, taking into account three future scenarios of climate change (RCP 2.6, 4.5, 8.5).

The final results underscore the central role played by Net Zero Energy buildings in mitigating the impact of the building sector on the challenges associated with energy transition and climate change. Thus, applying the "Cost-Optimality" methodology to achieve Net Zero Energy in collective residential buildings proves to be a pragmatic and viable approach toward a more environmentally friendly and resilient environment.

Through the adoption of diversified strategies, it becomes possible to create a built environment that not only reduces energy consumption but also mitigates greenhouse gas emissions. Despite initially higher investments, the undeniable viability of these Net Zero Energy buildings is affirmed, especially when considering various representative concentration scenarios. This highlights the crucial importance of prioritizing Net Zero Energy as a central element in initiatives to combat climate change.

Keywords: Net zero energy, Energy efficiency, Cost-optimality, Sustainable residential buildings, Climate change.

ملخص

في ظل تغير المناخ المتسارع وضرورات الممارسة المعمارية المستدامة، ينبغي التأكيد على أن القطاع السكني لا يزال أحد المصادر الرئيسية لاستهلاك الطاقة. مع هيمنة التصاميم الموحدة غالباً على حساب تدابير كفاءة الطاقة وإهمال الخصائص المناخية المحلية. يؤدي هذا الاتجاه إلى تمثيل ما يتجاوز ثلث إجمالي استهلاك الطاقة على المستوى العالمي والوطني. ولذلك، يصبح من الضروري اعتماد نهج استراتيجي واستباقي لتعزيز ممارسات البناء الأكثر استدامة وكفاءة في استخدام الطاقة.

تهدف هذه الدراسة إلى تطوير منهجية تعتمد على نهج "Cost-optimality" بهدف تحقيق صافي الطاقة الصفري في المباني السكنية الجماعية الجزائرية. يجمع هذا النهج استراتيجيات معمارية مختلفة، فضلاً عن استخدام الطاقات المتجددة. وذلك بالاعتماد على النهج الكمي، المراجعة الشاملة للمراجع المتعلقة بصافي الطاقة الصفري، استبيان يقيم مستوى معرفة المتخصصين في المجال بالإضافة لقياسات ميدانية لعدة حالات وكذلك استعمال النماذج والمحاكاة الرقمية. تُجرى هذه الدراسة في ثلاث مناطق مناخية متميزة، هي المناخ شبه الجاف بقسنطينة، والمناخ البحري بالجزائر العاصمة، والمناخ الجاف بغرداية. مع الأخذ في الاعتبار ثلاث سيناريوهات مستقبلية لتغير المناخ (RCP 2.6, 4.5, 8.5).

تسلط النتائج النهائية الضوء على الدور المركزي الذي تلعبه المباني ذات صافي الطاقة الصفري في التخفيف من تأثير قطاع البناء على التحديات المرتبطة بالتحول الطاقوي (بالتحول في مجال الطاقة) وتغير المناخ. وبالتالي، فإن تطبيق منهجية "Cost-optimality" لتحقيق صافي طاقة صفري في المباني السكنية الجماعية يثبت أنه نهج عملي وقابل للتطبيق للوصول لمحيط أكثر مرونة وصادق للبيئة.

من خلال تبني استراتيجيات متنوعة، يصبح من الممكن إنشاء بيئة مبنية لا تقلل من استهلاك الطاقة فحسب، بل تخفف أيضاً من انبعاثات الغازات الدفيئة. على الرغم من المتطلبات الاستثمارية العالية، إلا أنه تم تأكيد بصفة لا يمكن إنكارها على فعالية هذه المباني ذات صافي الطاقة الصفري، خصوصاً عند مراعاة مختلف السيناريوهات الممتثلة. وهذا يسلط الضوء على الأهمية الحاسمة لإعطاء الأولوية لصافي الطاقة الصفري كعامل رئيسي في مبادرات مكافحة تغير المناخ.

الكلمات المفتاحية: صافي الطاقة الصفري، الكفاءة الطاقوية، التحسين التكلفة، المباني السكنية المستدامة، تغير

المناخ.

**CHAPITRE - I - INTRODUCTION
GENERALE**

Introduction

« Une société peut s'épanouir lorsque les aînés plantent des arbres sous l'ombre desquels ils ne s'assiéront jamais »

— Proverbe grec

Les crises écologiques perdurent depuis de nombreuses années, et notre système écologique expose de manière dramatique ses vulnérabilités, conséquences de notre mode de vie et de l'utilisation déséquilibrée des énergies fossiles et des ressources non renouvelables. Toutefois, une prise de conscience grandissante concernant le changement climatique et son impact s'est diffusée à travers le monde, dans un effort visant à réduire les émissions de gaz à effet de serre.

La plus récente synthèse du rapport du GIEC révèle que depuis 1970, les émissions cumulées de CO₂e provenant des combustibles fossiles ont triplé, et que les effets du changement climatique sont déjà observables dans plusieurs régions du globe. Face à cette réalité, la nécessité de réduire les émissions mondiales de carbone de 80 % pour limiter l'élévation de la température moyenne mondiale de 2 à 4 °C est largement reconnue. En l'absence de mesures pour atténuer ces émissions ainsi que celles d'autres gaz à effet de serre, la température moyenne de la surface terrestre pourrait atteindre 6,4 °C d'ici la fin du XXI^e siècle (IPCC, 2014). L'augmentation de 2 °C de la température moyenne mondiale aurait des répercussions considérables sur l'environnement, la santé humaine et les écosystèmes naturels, en plus de compromettre la durabilité de l'agriculture mondiale (COP26, 2021).

Dans un contexte international et en réponse à ces défis mondiaux liés au changement climatique, l'Agenda 2030 a été instauré lors de la conférence de Kyoto en 1997, visant à promouvoir le développement durable au travers de divers objectifs appelés Objectifs de Développement Durable (ODD). De plus, lors de la 21^e session de la Conférence des Parties à la Convention-cadre des Nations Unies sur les changements climatiques (COP 21) qui s'est tenue à Paris en 2016, chaque pays a établi ses propres objectifs nationaux de réduction des émissions de gaz à effet de serre d'ici à 2030 (Janetschek & Iacobuta, 2019).

Lors de la COP26 en 2021 à Glasgow, l'accent a été mis sur l'atteinte de la neutralité carbone d'ici le milieu du siècle et le maintien de l'élévation de la température à 1,5 degré Celsius, en concrétisant les accords de Paris et en présentant des objectifs de réduction des émissions pour 2030 (CDN). Pour atteindre ces objectifs, les pays devront initialement convertir leurs ambitions en actions, renforcer la collaboration entre les gouvernements, les

entreprises et les organisations civiles, accélérer l'élimination graduelle des énergies fossiles et encourager les investissements dans les énergies renouvelables (COP26, 2021).

Le secteur du bâtiment est universellement reconnu comme un acteur essentiel du changement climatique, contribuant à hauteur d'environ 40 % à la consommation mondiale d'énergie et émettant environ un tiers des gaz à effet de serre mondiaux. De ce fait, la réduction de la consommation énergétique et l'amélioration de l'efficacité énergétique des bâtiments constituent aujourd'hui des objectifs incontournables dans les politiques énergétiques, aussi bien aux niveaux régional et national qu'international.

Au fil des décennies, les paradigmes architecturaux ont évolué, passant de l'architecture bioclimatique et environnementale à l'architecture verte et durable (Attia, 2016), abordant différents aspects de métriques visant à réduire la consommation énergétique. Parmi les exemples figurent les bâtiments à basse consommation d'énergie (BBC), les constructions à haute performance énergétique (HPE), les bâtiments à très haute performance énergétique (THPE) ainsi que les maisons passives, allant jusqu'aux bâtiments à énergie neutre ou positive (BEPOS). En effet, les édifices capables de répondre à leurs besoins énergétiques sans dépendre de sources externes sont perçus comme une voie permettant d'atteindre ces objectifs.

C'est ainsi que le concept de la Net Zéro Énergie gagne une attention croissante dans le secteur du bâtiment. Torcellini et al. définissent le Bâtiment à Énergie Zéro Net comme "un bâtiment qui a réduit sa consommation énergétique afin de parvenir à un équilibre entre la demande en énergie et l'approvisionnement en énergie provenant de technologies d'énergie renouvelable" (Torcellini & Crawley, 2006). Albadry et al. le caractérisent également comme un bâtiment ayant une consommation énergétique nulle sur une année, avec des besoins de chauffage électrique réduits et des approvisionnements en énergie renouvelable. Ils synthétisent en outre les caractéristiques des NZEB définies par la EPBD, à savoir : un bâtiment à haute efficacité énergétique, avec une demande en énergie réduite à presque zéro ou très faible, satisfaisant le reste de ses besoins énergétiques par des ressources renouvelables (Albadry et al., 2017). Toutefois, il convient de noter que malgré son importance, aucune définition commune du concept n'est établie, avec plus de 70 définitions et normes de la Net Zéro Énergie/Carbone émises dans le monde ces dernières années (Williams et al., 2016). Les définitions varient d'un pays à l'autre en fonction des besoins spécifiques de chaque partie ; par exemple, l'Union européenne privilégie souvent une définition basée sur la réduction des émissions de carbone, tandis qu'aux États-Unis, l'accent est davantage mis sur la consommation énergétique et l'efficacité énergétique.

Principalement, en raison de la croissance économique et démographique, la demande énergétique associée au secteur du bâtiment devrait atteindre des niveaux sans précédent dans les pays en développement, tels que l'Algérie. Malheureusement, malgré cette augmentation significative de la demande, les technologies liées à l'efficacité énergétique ne reçoivent pas une attention proportionnelle. Dans cette perspective, il n'est pas étonnant que le secteur de la construction se tourne désormais vers l'amélioration de l'efficacité énergétique des bâtiments, visant à atteindre une consommation minimale d'énergie tout en garantissant un confort optimal des occupants. Cette orientation joue un rôle crucial pour atténuer les effets du changement climatique et limiter le réchauffement planétaire.

L'Algérie a également mis en place plusieurs programmes visant à aborder ces enjeux. Le programme de l'Agence Nationale de la Promotion et la Rationalisation de l'Utilisation de l'Énergie (APRUE) ainsi que le Programme National Algérien d'Efficacité Énergétique pour le secteur du bâtiment en 2016 sont quelques-unes des initiatives majeures entreprises dans ce domaine. La mise en œuvre de ces programmes vise à réduire de manière progressive la croissance de la demande énergétique et à économiser plus de 7 millions de tonnes d'équivalent pétrole (MTEP) d'ici à 2030 (MTEER et al., 2022). Le gouvernement algérien accorde également une grande attention au potentiel des sources d'énergie renouvelable que le pays peut exploiter. À travers le Programme des Énergies Renouvelables, l'Algérie aspire à jouer un rôle de premier plan dans la production d'électricité à partir de sources telles que le photovoltaïque, l'éolien, la biomasse, la géothermie et le solaire thermique. L'objectif ambitieux est que 37 % de la capacité énergétique installée et 27 % de la production d'électricité destinée à la consommation nationale proviennent de sources renouvelables d'ici à 2030. L'importance de ces initiatives est soulignée par le gouvernement qui considère ces initiatives comme des opportunités et des moteurs du développement économique et social (Ministère de l'énergie et des mines, 2021). Un résumé de la métrique commune du carbone établi par le Programme des Nations Unies pour l'Environnement (PNUE) confirme que réduire de 30 à 50 % la quantité d'émissions de gaz à effet de serre dans ce secteur est envisageable grâce à l'utilisation des technologies existantes (UNEP-SBCI, 2009).

1. Problématique

Le problème du réchauffement climatique découlant de l'augmentation de la consommation énergétique et des émissions de carbone est devenu le plus pressant auquel la planète est confrontée aujourd'hui. Et en raison des mesures prises en réponse à la pandémie de COVID-19, les gens passent actuellement une grande partie de leur vie

quotidienne à l'intérieur, en utilisant des équipements de confort actif. Cela aggrave le fait que les bâtiments comptent parmi les plus grands consommateurs d'énergie à l'échelle mondiale, représentant près d'un tiers de la consommation totale d'énergie et des émissions de CO₂e (IEA, 2021). Selon les projections de l'International Energy Outlook (IEO), cette consommation devrait augmenter de 42 % d'ici à 2040 (EIA, 2016).

De même, en Algérie, l'urbanisation rapide a orienté la construction vers des bâtiments standardisés à forte consommation énergétique (Hadi Mousavi, 2020) (Benkhaled et al., 2022)(Ministère de l'Habitat, 1997), partageant souvent des conceptions architecturales, des méthodes de construction et des matériaux qui privilégient la quantité à la qualité, loin de répondre aux besoins changeants des utilisateurs, du climat et de l'environnement (Ministère de l'énergie, 2020). Ces bâtiments contribuent largement au changement climatique, étant responsables de plus de 30 % des émissions de CO₂e et de 36,6 % de la consommation finale d'énergie nationale, qui a atteint 17,6 millions de TEP en 2020, soit une augmentation de 2,6 % par rapport à 2018 et de 17 % par rapport à 2017 (Ministère de l'énergie, 2020).

L'Algérie a connu une croissance rapide de la demande d'énergie au cours des dernières décennies. Avec des ressources abondantes, notamment 9,2 milliards de barils de pétrole, 160 trillions de pieds cubes de gaz et un secteur minier diversifié offrant diverses matières premières telles que l'or et les pierres précieuses, le pays demeure dépendant des combustibles fossiles et de leurs exportations. La situation actuelle met en évidence la disparité flagrante selon laquelle l'ensemble de l'industrie énergétique algérienne repose largement sur les hydrocarbures. En 2010, le mix énergétique algérien se composait à 93 % de gaz naturel et à seulement 2 % d'énergies renouvelables, ce qui affecte la sécurité énergétique du pays (Zahraoui et al., 2021).

Malgré qu'au-delà des ressources hydrocarbonées, l'Algérie possède un potentiel considérable en énergie renouvelable, le développement de ces réserves énergétiques pourrait entraîner de nombreuses retombées positives pour l'Algérie, particulièrement en termes de diversification énergétique et de divers avantages environnementaux, économiques et sociaux (Dib et al., 2012).

Bien que la mise en œuvre du concept de la NZE puisse potentiellement représenter une solution pertinente pour relever les défis de durabilité en Algérie, il convient de noter qu'il n'existe actuellement aucune définition nationale formelle de ce concept. De plus, la notion d'efficacité énergétique demeure largement négligée dans ce contexte. Cela est probablement dû à un manque de clarté et aux défis liés à la mise en œuvre des politiques, codes et réglementations dans ce domaine. À l'échelle mondiale, plusieurs définitions de la

NZE existent, variant en termes de développement et d'application du concept, mais avec un manque de lignes directrices, de normes et de codes pour la conception, la mise en œuvre et le fonctionnement des différentes stratégies associées à ce concept (Nduka et al., 2019).

De plus, les considérations économiques du secteur de la construction contribuent souvent à sa résistance au changement (Morrissey et al., 2011). Les concepteurs et les promoteurs estiment que les coûts initiaux constituent un obstacle majeur à la construction de bâtiments performants visant à atteindre une énergie nette zéro (Hu, 2019). À cela s'ajoute le prix exceptionnellement bas de l'énergie en Algérie, avec un tarif de l'électricité pour le secteur résidentiel à 4,179 DA/kWh (environ 0,026 euros) et le gaz à 0,324 DA/kWh (environ 0,002 euros) pour la tranche de consommation la plus élevée (Ministère de L'Énergie, 2015).

Le chemin vers l'atteinte de la NZE dans les bâtiments est accompagné de plusieurs défis, principalement des aspects techniques à surmonter, tels que l'intégration des énergies renouvelables et des systèmes économes en énergie. De plus, le rythme rapide des avancées technologiques introduit un élément d'incertitude, car certaines solutions pourraient devenir obsolètes, posant des défis pour la planification et le développement à long terme. Les données précises sur la consommation d'énergie, le potentiel des énergies renouvelables et les performances actuelles des bâtiments sont cruciales, mais des défis persistent pour obtenir de telles données. En fin de compte, la réalisation du concept de la NZE nécessite une collaboration solide entre les parties prenantes, notamment les architectes, les ingénieurs, les entrepreneurs, les décideurs politiques et les occupants. Cela met en évidence la complexité et l'effort collectif requis pour atteindre cet objectif ambitieux en matière de développement durable. De plus, les attitudes sociétales et les perceptions culturelles liées à la consommation énergétique, à l'esthétique et au confort influencent l'adoption des technologies de la NZE, et le niveau de connaissance et de sensibilisation des parties prenantes au concept et aux avantages des pratiques et des technologies de la NZE demeure essentiel (Mcnabb, 2013).

2. Questionnements

2.1. Principal

- Dans quelles mesures peut-on atteindre la NZE tout en gardant l'optimalité énergie/coûts ?

2.2. Secondaire

- Quelle est la définition de la NZE la plus convenable au contexte algérien ?
- Quels sont l'état et le niveau de sensibilisation des professionnels sur le sujet de la NZE en Algérie ?

3. Hypothèses

- La NZE peut aider à avoir une consommation net nulle avec un coût optimal, et un plus ou moins court retour sur investissement.

4. But et objectifs

4.1. But

Développer une méthodologie en s'appuyant sur l'approche 'cost-optimality' permettant d'implanter les stratégies optimales de la NZE dans les bâtiments résidentiels pour augmenter l'efficacité énergétique, réduire le coût et la dépendance aux énergies fossiles tout en utilisant des matériaux et des ressources disponibles.

4.2. Objectifs

- Établissement d'une définition de l'énergie nette zéro adaptée au contexte algérien.
- Calcul des effets des stratégies optimales en matière de coût et d'énergie.
- Formulation de recommandations et d'exigences minimales pour atteindre la NZE.

5. Méthodologie

Aproche de recherche : Recherche quantitative et qualitative.

Méthodologie : Modélisation et Observation.

Méthodes : Revue de la littérature et de l'état de l'art, Questionnaire, Mesures sur le terrain,

Modèles de simulation.

5.1. Définition du concept de base et Questionnaire (État de l'art et Enquête)

Cette étape vise à fournir une description des différentes définitions de la net zéro énergie au fur et à mesure du temps dans le but de les simplifier et mieux la comprendre.

Les étapes sont les suivantes :

- Commencer par une analyse de l'état de l'art de la net zéro énergie.
- Estimer la sensibilisation et le niveau de connaissance des professionnels aux mesures d'efficacité énergétique, aux changements climatiques et au concept

d'énergie net zéro dans le secteur du bâtiment grâce à une enquête distribuée aux différents BET dans toutes les régions de l'Algérie.

- Rassembler les termes et concepts énergétiques et climatiques les plus importants identifiés comme manquants dans la connaissance du secteur professionnel sur la base des résultats de l'enquête.
- Simplifier ces termes et concepts pour une compréhension plus large.

5.2. Définition des bâtiments de référence et des climats d'étude (Collecte et traitement des données)

L'objectif de la deuxième étape est de collecter et de traiter les données avec les étapes suivantes :

- Étudier et sélectionner les types de bâtiments résidentiels les plus courants et représentatifs.
- Caractériser les matériaux de construction couramment utilisés.
- Choisir des sites d'étude pour une investigation approfondie.
- Caractériser les conditions climatiques, y compris la température, l'irradiation solaire, les précipitations et le vent, à l'aide d'un fichier climatique approprié (basé sur les données météorologiques disponibles ou la base de données climatique disponible).

5.3. Définition des variables de conception (Collecte et traitement des données)

L'objectif de la troisième étape est de définir et de sélectionner les stratégies et variables de mesures de performance énergétique et des conditions économiques avec les étapes suivantes :

- Choisir des stratégies pour différentes étapes du processus de simulation, telles que les stratégies passives, les stratégies actives et l'utilisation des énergies renouvelables.
- Rechercher de données et d'informations chez des fabricants locaux et des professionnels pour chaque stratégie choisie.
- Rechercher au moins trois fabricants pour chaque variable et calculer une moyenne des prix de chaque objet.
- Définir les aspects économiques tels que le prix de l'énergie, les coûts initiaux, les coûts d'investissement et les coûts de remplacement.

5.4. Mesure sur le terrain de la température et de l'humidité

Diverses mesures, prenant en compte la température et l'humidité de l'étude de cas, ont été effectuées pour contribuer de manière cruciale à la validation et à la calibration ultérieure du modèle. Ces mesures ont été réalisées à l'aide de quatre appareils PCE-HT 71N déployés dans différentes pièces de l'appartement. Un deuxième appareil, Delta OHM HD 32.3, a également été utilisé pour valider les données des autres appareils et enrichir les données relatives à l'humidité. De plus, une collecte de factures d'électricité et de gaz sur cinq ans a été entreprise pour aider à la validation et à la calibration du modèle.

5.5. Optimisation énergétique et financière (Développement d'instruments et Application)

Dans cette étape, une simulation sera réalisée dans un processus d'optimisation. Le modèle du bâtiment résidentiel sera analysé à l'aide de la simulation énergétique dynamique BEopt, un logiciel de moteur de simulation développé par le National Renewable Energy Laboratory (NREL) des États-Unis. Le calcul dans BEopt utilise la simulation énergétique horaire EnergyPlus développée par le Lawrence Berkeley National Laboratory et le département de l'énergie des États-Unis, permettant de tester différentes stratégies et de calculer leur impact sur l'intensité d'utilisation de l'énergie du bâtiment. Ensuite, la rentabilité et les périodes de récupération seront calculées pour trouver les scénarios les plus économiques. Cela comprend les étapes suivantes :

- Exécution de simulations énergétiques à l'aide de l'outil de simulation dynamique BEopt et calibration du modèle de référence.
- Réalisation d'une analyse paramétrique du benchmark sélectionné pour optimiser l'énergie en appliquant différentes stratégies de conception et techniques conformément.
- Fourniture d'une vue d'ensemble des performances énergétiques.
- Offre d'une vue d'ensemble des performances financières.
- Définition de l'optimum économique avec l'optimum de Pareto.

5.6. Scénarios RCP et futurs scénarios de changement climatique (Développement d'instruments, Application et Projections)

La sixième étape utilise différentes trajectoires de concentration représentatives (2.6, 4.5, 8.5) créées à l'aide de climat consultant et de données du dernier rapport du GIEC. Cela permet de créer des fichiers de données météorologiques utilisés pour simuler :

- Les trois études de cas de Constantine, Alger et Ghardaïa.
- Les stratégies utilisées (passives, actives et énergies renouvelables).
- Les résultats les plus récents d'énergie nette zéro.

5.7. Recommandations et exigences minimales futures pour les bâtiments résidentiels

Cette étape consiste à proposer des recommandations, des exigences minimales et une feuille de route pour atteindre la net zéro l'énergie et la durabilité dans les bâtiments.

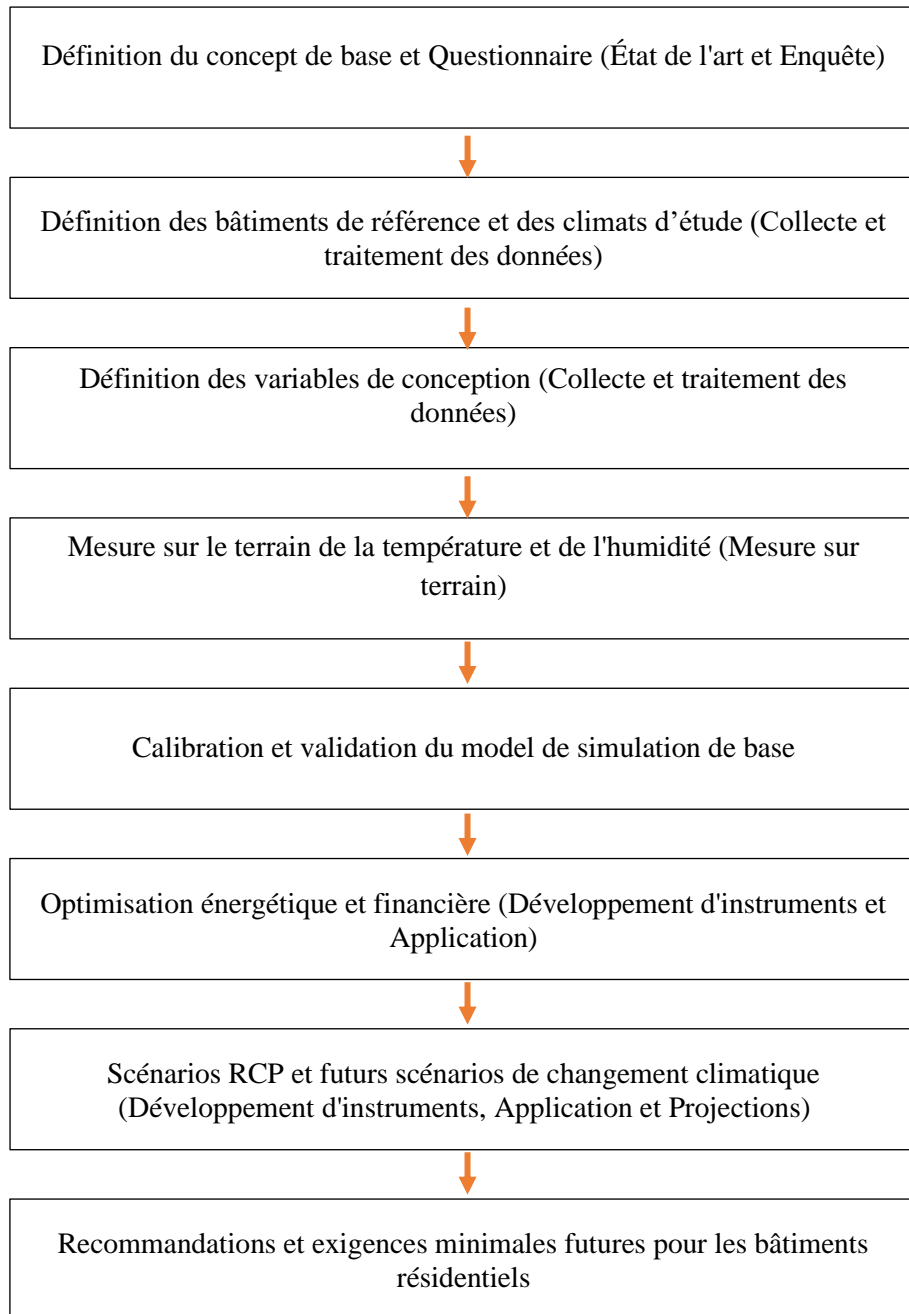


Figure 1.1 Résumé de la méthodologie
Source : (Auteur, 2022)

6. Plan du manuscrit

La thèse a été divisée en deux grandes parties. La première comprend les deux premiers chapitres théoriques, tandis que la seconde englobe les quatre derniers chapitres pratiques. Les éléments clés de chaque chapitre peuvent être résumés comme suit :

Chapitre I : Introduction générale abordant notre thème, traitant des divers problèmes liés au changement climatique, à la surconsommation énergétique et aux émissions de gaz à effet de serre.

Chapitre II : Exploration de l'évolution de la notion de Net Zéro Énergie (NZE), depuis ses débuts modestes dans les maisons solaires jusqu'à son incarnation contemporaine. Ce chapitre intègre également la catégorisation conceptuelle, la métrique et la hiérarchie conceptuelle. De plus, il examine les différentes stratégies adoptées par les chercheurs pour atteindre la NZE, ainsi que les considérations économiques associées à cette approche.

Chapitre III : Vulgarisation des bases de l'énergie, avec une étude approfondie sur le secteur résidentiel et le paysage énergétique algérien. Ce chapitre se clôture par l'analyse des résultats de notre questionnaire visant à évaluer la sensibilisation et les connaissances des professionnels à l'égard de la NZE.

Chapitre IV : Étude du cadre méthodologique, détaillant la méthodologie du "Coût-Optimal" et son adaptation aux contextes de notre étude.

Chapitre V : Examen des résultats des simulations, explorant l'impact des stratégies passives et soulignant l'importance cruciale de la synergie entre l'architecture et le contexte.

Chapitre VI : Examen des résultats des simulations des stratégies actives, ainsi que l'intégration des énergies renouvelables. Ce chapitre expose les répercussions des avancées technologiques sur l'efficacité énergétique.

Chapitre VII : Le dernier chapitre représente la projection des résultats dans la temporalité future en utilisant différents scénarios de changement climatique (RCP). Cela est réalisé en considérant différentes stratégies actives, passives, et d'énergies renouvelables.

Chapitre VIII : Conclusion générale résumant les résultats de l'étude, répondant aux questions posées, identifiant les limites de la recherche, ainsi que les orientations futures et les opportunités liées au sujet.

**CHAPITRE - II - BATIMENT NET
ZERO ENERGIE : ENTRE
DEFINITION, STRATEGIE ET COUTS**

Introduction

« On protège ce qu'on aime, et on aime ce qu'on connaît »

— Jacques Cousteau

La NZE dans le Bâtiment est un concept qui a pris de l'ampleur ces dernières années en raison des préoccupations croissantes en matière d'économie d'énergie et de changement climatique. Ce concept vise à concevoir des bâtiments capables de produire autant d'énergie qu'ils en consomment, atteignant ainsi un équilibre dans l'utilisation de l'énergie et permettant de réduire considérablement les émissions de carbone ainsi que les coûts d'exploitation.

Cependant, malgré l'engouement pour la NZE, il existe actuellement des centaines de définitions élaborées par différentes entités dans le monde, tandis que seulement quelques bâtiments NZE ont été réellement réalisés. L'absence d'une définition globale commune rend la mise en œuvre de ce concept difficile pour les professionnels de la construction. Les divergences entre les définitions, les stratégies et les coûts ont soulevé des questions concernant leur faisabilité et leur praticité.

Ce chapitre présente une vue d'ensemble du concept des bâtiments NZE, en suivant une approche historique des différentes définitions clés, de leurs catégories et de leurs métriques. Il aborde également les stratégies utilisées par les chercheurs pour atteindre la NZE, notamment les stratégies passives, les stratégies actives et l'intégration d'énergies renouvelables. Les coûts associés à la conception et à la construction des bâtiments NZE sont par ailleurs abordés dans ce chapitre, en examinant l'investissement initial requis ainsi que le potentiel de retour sur investissement en termes d'économies d'énergie et de réduction des coûts d'exploitation. Enfin, il traite de l'adaptation de la définition de la NZE au contexte algérien.

En résumé, ce chapitre offre un aperçu approfondi du concept de la Net Zéro Énergie, en mettant en lumière les défis et les opportunités liés à sa mise en œuvre dans le domaine de la construction durable. Il vise à fournir aux lecteurs une compréhension approfondie des fondements théoriques et pratiques de la NZE, ainsi que des considérations financières associées à son adoption.

1. Définition Approfondie de la Net Zéro Énergie

Bien que la majorité des définitions des bâtiments NZE aient les mêmes objectifs, elles restent sans accords, génériques et non standardisées, il est encore nécessaire de mieux définir et se mettre d'accord sur des normes nationales et internationales claires. Il y a beaucoup de définitions et de normes NZE dans le monde tandis que seulement quelques bâtiments NZE ont été réellement réalisés (56 normes pour seulement 379 bâtiments dans le monde), cela suggère que l'état actuel du concept ne répond toujours pas aux exigences de la réalité. En raison du débat toujours en cours sur sa définition (Williams et al., 2016).

1.1. ZEH – Maison Zéro Energie

L'une des premières définitions de la NZE est celle d'Esbensen et Korsgaard en 1977, (Zero Energy House - ZEH), qui est selon eux une maison dimensionnée pour être autosuffisante en matière de chauffage et d'eau chaude sanitaire dans des conditions climatiques normales (Esbensen et Korsgaard 1977) (Kibert & Fard, 2012). Gilijamse vient ajouter en 1995 que la maison à zéro énergie est une maison où aucun combustible fossile n'est consommé et où la consommation annuelle est égale à la production annuelle d'électricité. Contrairement à la situation autarcique, le réseau électrique agit comme un tampon pour équilibrer la consommation et la production chaque année (Gilijamse 1995) (Kibert & Fard, 2012). Iqbal en 2004 vient définir la maison à zéro énergie (ZEH) à son tour, qui est, pour lui, un terme utilisé pour décrire un bâtiment dont le rapport entre la consommation et la production annuelle d'énergie est égal à celui des énergies renouvelables. Cela peut être fait avec la combinaison d'une ou plusieurs ressources d'énergie renouvelable disponibles et en utilisant des technologies d'efficacité énergétique, le tout sans utiliser de combustibles fossiles, et peut être connecté ou non au réseau (Iqbal, 2004). Charron en 2005 a utilisé le terme de maisons solaires à énergie net zéro en le définissant comme étant des maisons qui utilisent des technologies solaires photovoltaïques et thermiques pour générer une quantité d'énergie équivalente à leur consommation d'énergie (Charron, 2005). Une maison à énergie net zéro (ZEH) est définie comme une maison qui, au cours d'une année, produit la même quantité d'énergie qu'elle en consomme, grâce aux énergies renouvelables (Mertz et al., 2007). Rosta et al. en 2008 illustrent l'une des plus simples définitions en la décrivant comme étant un bâtiment qui produit autant d'énergie qu'il en consomme en un an (Rosta et al. 2008) (Kibert & Fard, 2012).

1.2. NZE – Bâtiments Net Zéro Energie

La deuxième phase de la définition vient ensuite avec Torcellini, qui substitue le terme "maison" par le terme "bâtiment" et affirme qu'un bâtiment zéro énergie (Zero Energy Building - ZEB) peut être défini de plusieurs façons, en fonction des délimitations physiques et des métriques. Différentes définitions peuvent être utilisées, en fonction des objectifs du projet, des valeurs de l'équipe de conception et du propriétaire du bâtiment. Pour Torcellini, "Un bâtiment net zéro énergie (NZE) est un bâtiment qui réduit sa consommation énergétique afin d'équilibrer la demande et l'offre des technologies d'énergie renouvelable" (Torcellini & Crawley, 2006). Laustsen définit le NZE comme un bâtiment qui n'utilise pas d'énergie provenant de combustibles fossiles et qui tire toute son énergie de sources renouvelables (Laustsen, 2008). Aelenei a son tour définit la NZE comme un bâtiment dont la consommation est neutre sur la base d'une année, produisant autant d'énergie qu'il en utilise à partir des réseaux énergétiques, en s'appuyant sur l'utilisation de mesures d'efficacité énergétique combinées aux énergies renouvelables produites sur site (Aelenei et al., 2010). Pour Sartori, la NZE doit avoir un équilibre entre l'importation et l'exportation énergétique sur une période donnée, qui doit être nul, voire positif, c'est-à-dire que dans le cas où l'énergie intrinsèque ou les émissions intrinsèques des matériaux doivent également être compensées. L'équation 2.1 d'équilibre suivante est donc une exigence minimale pour une NZE (Sartori et al., 2010) :

$$\text{NZE} = |\text{exportation}| - |\text{importation}| \geq 0 \quad (2.1)$$

Le bilan peut être représenté graphiquement en reportant l'énergie importée sur l'axe des x et l'exportation sur l'axe des y (Figure 2.1).

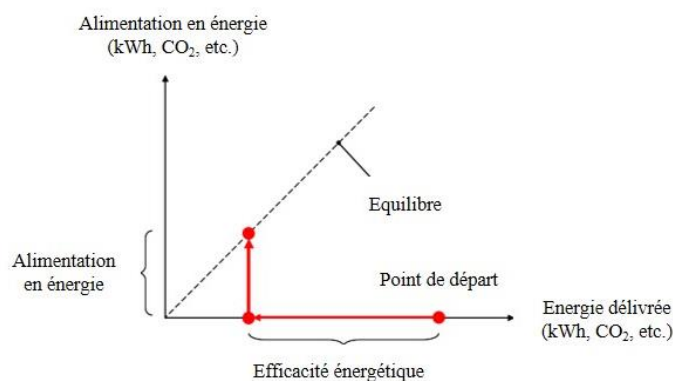


Figure 2.1 Graphe représentant l'équilibre de la NZE

Source : (Sartori et al., 2010)

Voss affirme que la compréhension du terme NZE est principalement basée sur l'équilibre annuel entre la demande d'énergie et la production d'énergie sur le site du bâtiment, et fonctionne en synergie avec une infrastructure énergétique telle que le réseau électrique (Voss et al. 2010) (Kibert & Fard, 2012). Lund et al. expliquent que la NZE combine la conception à haute efficacité énergétique pour minimiser la demande de chauffage et d'électricité avec une production d'énergie renouvelable sur site, comprenant généralement un système de production d'eau chaude solaire et un système photovoltaïque en toiture. Le bâtiment peut être raccordé au réseau ou être autonome (Lund et al 2011) (Kibert & Fard, 2012). Salom indique que la NZE peut être défini comme un bâtiment connecté au réseau qui produit autant qu'il consomme sur un bilan annuel, et cet équilibre est atteint en utilisant des mesures d'efficacité énergétique et des énergies renouvelables (Salom et al., 2011). Sartori en 2012 améliore son équation en y ajoutant la pondération avec l'équation 2.2 (Sartori et al., 2012) :

$$\text{NZE} = |\text{exportation pondérée}| - |\text{importation pondérée}| \geq 0 \quad (2.2)$$

Hootman simplifie la définition et explique qu'à la base, la NZE est une mesure de la performance énergétique d'un bâtiment, selon laquelle celui-ci produit autant ou plus d'énergie renouvelable qu'il en utilise au cours d'une année de fonctionnement. Cette définition repose sur deux concepts clés. Premièrement, "net" signifie que des sources d'énergie non renouvelables (combustibles fossile et nucléaire) peuvent être utilisées, mais que, sur une année, suffisamment d'énergie renouvelable doit être produite pour que le projet puisse compenser ou dépasser l'utilisation d'énergie non renouvelable. Deuxièmement, "l'équilibre" le concept de la NZE ne signifie pas que le bâtiment ne consomme pas d'énergie ; il fait plutôt référence à l'atteinte d'une position d'équilibre d'énergie (Hootman, 2013). Szalay et Zold indiquent que lors de l'établissement d'une définition NZE, les exigences doivent être rigoureuses et strictes, mais aussi réalistes, et ne doivent pas être basées uniquement sur quelques références de bâtiments, mais plutôt sur des principes communs tels que l'énergie maximale nécessaire, la part minimale d'énergies renouvelables et le degré total admissible des émissions totales de CO₂e (Szalay & Zöld, 2014). Albadry définit la NZE comme étant un bâtiment à très haute efficacité énergétique, avec une demande réduite à presque zéro et utilisant les énergies renouvelables pour atteindre l'équilibre (Albadry et al., 2017). Harkouss, à son tour, définit la NZE comme un bâtiment à faible consommation énergétique dont la consommation énergétique annuelle est équilibrée grâce aux énergies

renouvelables. Elle divise la NZE en deux groupes : hors réseau et raccordait au réseau, et souligne qu'une NZE de haute qualité est celle qui utilise au maximum les stratégies passives et les technologies d'efficacité énergétique avant de recourir aux énergies renouvelables pour assurer l'équilibre (Harkouss, 2018).

Quelques exemples sur les exigences en matière énergétique de certains pays européens (Tableau 2.1) :

Tableau 2.1 Exigences en matière énergétique de certains pays européens

Source : (Harkouss, 2018)

Pays	Année d'application Publique	Définition du NZE pour les nouveaux bâtiments		Définition NZE pour les bâtiments existants	
		Énergie primaire maximum (kWh/m ² /an)		Énergie primaire maximum (kWh/m ² /an)	
		Bâtiments résidentiels	Bâtiments non résidentiels	Bâtiments résidentiels	Bâtiments non résidentiels
Autriche	2019	160	170 (depuis 2021)	200	250 (depuis 2021)
Belgique	2015	45	90 [a]	54	108 (a)
Bulgarie	2019	30-50	40-60	30-50	40-60
Chypre	2019	100	125	100	125
Danemark	2019	20	25	20	25
France	2011	40-65 [a, b]	70-110 [a,b]	80 [b]	60% PE [a]
Allemagne	2019	40% PE [c]	Développement	55% PE [c]	Développement
Hongrie	2019	50-72 [a]	60-115 [a]	Développement	Développement
Lettonie	2019	95	95	95	95
Malte	2019	40	60	Non défini	Non défini
Pologne	2019	60 [a]	75 [a]	Non défini	Non défini
Slovénie	2019	45-50 [a]	70	70-90 [a]	100
Suède	2019	30-75 [a, b]	30-105 [a, b]	Non défini	Non défini

[a] En fonction du bâtiment de référence. [c] Consommation maximale d'énergie primaire définie en pourcentage de la consommation d'énergie primaire (EP) d'un bâtiment de référence.

Il existe une différence entre les définitions des NZE basées sur les politiques régionales. Par exemple, l'Union européenne est plus axée sur le changement climatique et l'environnement, et c'est là que la définition du zéro carbone est la plus utilisée, contrairement aux États-Unis d'Amérique où la définition est davantage basée sur la consommation énergétique (Taherahmadi et al., 2021). En fonction du domaine de recherche, différents types d'objectifs et de préoccupations sont pris en compte :

- Les concepteurs de bâtiments : énergie et coûts pour se conformer aux codes.

- Utilisateurs des bâtiments : consommation d'énergie et coûts.
- Gouvernements : approvisionnement en énergie.
- Organisations environnementales : Gaz à effet de serre et émissions.

1.3. Évolution du concept et du cadre légal de la NZE

Dans le cadre légal, la loi du Congrès des États-Unis d'Amérique EISA (2007) établit une première définition du concept NZE pour les bâtiments commerciaux. Elle le définit comme étant un bâtiment commercial à haute performance conçu, construit et exploité pour fonctionner avec une quantité d'énergie considérablement réduite, répondre à l'équilibre des besoins énergétiques à partir de ressources d'énergie renouvelable, ne produire aucune émission de gaz à effet de serre et être économiquement viable EISA (2007) (Kibert & Fard, 2012).

Pour le ministère américain de l'Énergie (DOE) : "la NZEB est un bâtiment économe en énergie dans lequel l'énergie source annuelle utilisée est inférieure ou égale à l'énergie renouvelable produite sur place". Cependant, construire à des niveaux de performance net zéro énergétique peut être un défi. Les mesures d'efficacité énergétique, les ressources de production d'énergie sur site, l'adaptation de la charge et l'interaction avec le réseau, les facteurs climatiques et les politiques locales varient d'un endroit à l'autre et nécessitent des méthodes de construction uniques. L'objectif du DOE était de construire "des maisons NZE commercialisables d'ici à 2020 et des bâtiments NZE commerciaux d'ici à 2025". À ce moment-là, la technologie nécessaire pour ce type de bâtiments à haut rendement énergétique était prête et disponible (US DOE, 2008).

La Directive sur la Performance Énergétique des Bâtiments (DPEB) européenne précise quant à elle, en 2010, que d'ici à 2020, tous les nouveaux bâtiments devront être des "bâtiments à consommation énergétique quasi nulle". Elle les définit comme étant des bâtiments avec une performance énergétique très élevée, qui couvrent le reste de leur demande énergétique avec des énergies renouvelables produites sur place ou à proximité. Elle exige la définition de plusieurs seuils communs, durables et réalistes pour la définition de la NZE (EPBD, 2018) :

- Le besoin énergétique maximal admissible.
- La part minimale de la demande en énergie renouvelable.
- La demande globale d'énergie primaire et les émissions de CO₂

L'organisation Green Building Advisor, en 2010, définit les bâtiments à consommation énergétique net zéro comme étant des bâtiments qui produisent autant d'énergie sur site annuellement qu'ils n'en consomment généralement à l'aide d'énergies renouvelables telles que le photovoltaïque ou les éoliennes (GreenBuildingAdvisor 2010) (Kibert & Fard, 2012).

Quelques exemples des critères traités par les différentes organisations de certains pays européens et américains (Tableau 2.2) :

Tableau 2.2 exemples des critères traités par les différentes organisations de certains pays européens et américains

Source : (Harkouss, 2018)

Référence /Critère	CO2e	Bilan (Demande-RE)	Génération sur site	Génération sur empreinte du bâtiment	Génération hors site	Étanchéité du bâtiment	Coût
ASHRAE		X	X				
REHVA		X	X			X	
EPBD			X	X		X	
US-DOE		X	X	X		X	
IEA	X	X	X				

2. Les différentes catégories de la NZE

La NZE est généralement classée en quatre catégories principales qui englobent l'énergie, les coûts, les émissions et l'exergie :

2.1. Net Zéro énergie

Un bâtiment à énergie net zéro est un bâtiment économe en énergie qui respecte au moins les normes minimales de bien-être prévues par les codes de construction de la région. On le divise en deux catégories :

2.1.1. Net Zéro Site

Un bâtiment à énergie net zéro site produit au moins autant d'énergie renouvelable qu'il en utilise au cours d'une année, en comptabilisant l'énergie au niveau du site de construction. Les calculs d'énergie du site sont réalisés en traçant une frontière autour du site, et toute l'énergie produite et consommée dans cette limite est prise en compte (Torcellini & Crawley, 2006) (Hootman, 2013).

La Net Zéro Site peut être définie avec l'équation 2.3 :

$$\text{Net Zéro Site} = \text{EnR produite sur site} - \text{Consommation finale} \geq 0 \quad (2.3)$$

2.1.2. Net Zéro Source

Un bâtiment à énergie net zéro source est un bâtiment qui produit autant d'énergie qu'il en consomme, soit par production sur place, soit par achat d'énergie. Le site du bâtiment ne constitue pas une limite dans ce cas (Torcellini & Crawley, 2006) (Hootman, 2013). La Net Zéro Source peut être définie avec l'équation 2.4 :

$$\text{Net Zéro Source} = \text{Energie produite/acheter} - \text{Consommation finale} \geq 0 \quad (2.4)$$

Selon le degré d'achèvement de l'équation, la NZE peut être défini de trois manières (Taherahmadi et al., 2021):

- **Les bâtiments à énergie quasi nulle** sont des bâtiments connectés au réseau qui, malgré l'utilisation d'énergie renouvelable sur place pour fournir l'énergie, importent plus d'énergie qu'ils n'en utilisent au cours d'une année.
- **Les bâtiments à énergie nulle** sont des bâtiments hors réseau qui peuvent répondre de manière indépendante à leur demande d'énergie à partir de ressources énergétiques renouvelables sur place et qui disposent également d'une capacité de stockage d'énergie pour la nuit et l'hiver.
- **Les bâtiments à énergie positive** sont des bâtiments connectés au réseau qui fournissent plus d'énergie au réseau qu'ils n'en importent. Sur une année, ces bâtiments produisent plus d'énergie à partir de ressources renouvelables sur place que leur demande.

2.2. Net Zéro Coût

Le coût reste toujours une question cruciale dans tous les domaines liés à la consommation d'énergie et représente l'un des principaux obstacles à la réalisation de l'objectif des bâtiments zéro énergie. Récemment, l'aspect du coût a été ajouté aux considérations concernant la NZE (Taherahmadi et al., 2021). Un bâtiment à coût énergétique net nul peut être défini comme un bâtiment qui reçoit au moins autant d'argent pour l'énergie renouvelable exportée qu'il ne dépense pour l'énergie et les services énergétiques fournis par le service public au cours d'une année (Torcellini & Crawley, 2006) (Hootman, 2013). La Net Zéro Coût peut être définie avec l'équation 2.5 suivante :

$$\text{Net Zéro Coût} = \text{Revenu des énergies renouvelables} - \text{Coût de l'énergie achetée} \geq 0 \quad (2.5)$$

Selon le degré d'achèvement de l'équation, la Net Zéro Coût peut être définie de trois manières différentes (Taherahmadi et al., 2021) :

- **Les bâtiments à coût énergétique quasi nul** sont des bâtiments connectés au réseau dont le revenu total sur une année provenant de la vente de l'énergie produite sur place au réseau est inférieure au coût d'achat de l'énergie au réseau.
- **Les bâtiments à coût énergétique nul** sont des bâtiments hors réseau qui peuvent répondre de manière indépendante à leur demande d'énergie à partir de ressources énergétiques renouvelables sur place et qui disposent également d'une capacité de stockage d'énergie pour la nuit et l'hiver. Par conséquent, le coût d'utilisation des combustibles fossiles dans ces bâtiments est nul.
- **Les bâtiments à coût énergétique positif** sont des bâtiments raccordés au réseau qui, sur une année, génèrent un revenu total supérieur au coût d'achat de l'énergie au réseau grâce à la vente d'énergie produite sur place.

2.3. Net Zéro Emissions

Un bâtiment à émissions net nulles est avant tout un bâtiment économe en énergie qui doit respecter au moins les normes minimales de bien-être et qui produit ou achète suffisamment d'énergie renouvelable sans émissions pour compenser les émissions de l'ensemble du projet. En d'autres termes, les émissions d'énergie produites par le bâtiment sont calculées et équilibrées avec l'énergie renouvelable sans émissions qu'il produit. La Net Zéro Émissions est probablement l'un des meilleurs modèles pour les bâtiments durables, mais c'est aussi l'un des plus difficiles à calculer, car il est ardu de trouver les données relatives aux facteurs d'émissions de chaque élément de construction (Torcellini & Crawley, 2006) (Hootman, 2013) (Williams et al., 2016) (Taherahmadi et al., 2021). La Net Zéro Emissions peut être définie avec l'équation 2.6 suivante :

$$\text{Net Zéro Emissions} = \text{Emissions réduite} - \text{Emission émis} \geq 0 \quad (2.6)$$

Selon le degré d'achèvement de l'équation, la Net Zéro Émissions peut être définie de trois manières différentes (Taherahmadi et al., 2021) :

- **Les bâtiments à émission de carbone quasi nulle** sont des bâtiments connectés au réseau qui, malgré l'utilisation d'équipements d'énergie renouvelable sur site pour fournir de l'énergie sans émissions, importent plus d'énergie que celle sans émissions exportées vers le réseau au cours d'une année.
- **Les bâtiments autonomes à zéro carbone** sont des bâtiments hors réseau qui peuvent répondre de manière indépendante à leur demande d'énergie à partir de ressources énergétiques renouvelables sans émissions sur place.
- **Les bâtiments à bilan carbone négatif** sont des bâtiments connectés au réseau qui fournissent au réseau plus d'énergie sans émissions que d'énergie importée. Sur une année, ces bâtiments produisent plus d'énergie sans émissions, à partir de ressources énergétiques renouvelables sur place, que leur demande.

2.4. Net Zéro Exergie

Le terme "exergie" est une combinaison de la première loi de la thermodynamique (bilan énergétique) et de la deuxième loi de la thermodynamique (bilan entropique), permettant d'analyser cet aspect des performances (Kilkis, 2007). L'exergie est la partie d'un flux d'énergie qui peut être convertie en toute autre forme d'énergie utile, représentant ainsi le potentiel d'une quantité d'énergie donnée à effectuer un travail. Bien que la définition d'une NZE semble logique, elle ne reconnaît pas l'importance de l'exergie dans l'évaluation de l'impact complet des bâtiments sur l'environnement. Un bâtiment à exergie net nulle est un bâtiment dont la somme totale annuelle du transfert d'exergie à travers la frontière du bâtiment dans un système énergétique de district est nulle, pendant tout le transfert d'énergie électrique ou autre qui a lieu pendant une certaine période (Taherahmadi et al., 2021).

La Net Zéro Exergie peut être définie avec l'équation 1.7 :

$$\text{NZ Exergie} = \text{exergie exportée} - \text{exergie importée} \geq 0 \quad (2.7)$$

Selon le degré d'achèvement de l'équation, la Net Zéro exergie peut être défini de trois manières différentes (Taherahmadi et al., 2021) :

- **Les bâtiments à exergie quasi nulle** sont des bâtiments connectés au réseau qui, malgré l'utilisation d'énergie renouvelable sur site pour fournir de l'énergie, importent plus d'exergie que celle exportée vers le réseau au cours d'une année.

- **Les bâtiments autonomes à exergie nulle** sont des bâtiments hors réseau qui peuvent répondre de manière indépendante à leur demande en exergie à partir de ressources énergétiques renouvelables sur place.
- **Les bâtiments à exergie positive** sont des bâtiments connectés au réseau qui fournissent plus d'exergie au réseau que d'exergie importée. Sur une année, ces bâtiments produisent plus d'exergie, à partir de ressources énergétiques renouvelables sur place, que leur demande.

2.5. Avantages et désavantages des différentes catégories

La NZE est un concept important dans la conception durable des bâtiments, visant à équilibrer l'énergie reçue et l'énergie consommée en s'appuyant sur les énergies renouvelables. Il existe plusieurs types de Net Zéro, chacun avec ses avantages et ses inconvénients (Tableau 2.3).

Tableau 2.3 Les différentes définitions et leurs caractéristiques.

Source : (Auteur, 2023)

Définition	Avantages	Désavantages
Net Zéro Site	<ul style="list-style-type: none"> • Simple à mettre en œuvre. • Vérifiable par des mesures sur site. • Aucune externalité n'affecte la performance. • Facile à comprendre et à communiquer pour la communauté des constructeurs. • Encourage la conception de bâtiments à haut rendement énergétique. 	<ul style="list-style-type: none"> • Ne tiens pas compte de tous les coûts des services. • Ne permet pas de mettre sur un pied d'égalité les types de combustibles. • Ne tiens pas compte des différences non énergétiques entre les types de combustibles (disponibilité de l'approvisionnement, pollution).
Net Zéro Source	<ul style="list-style-type: none"> • Permet d'équilibrer la valeur énergétique des types de combustibles. • Meilleur modèle pour l'impact sur le système énergétique national. 	<ul style="list-style-type: none"> • Calculs à la source trop vague (ne tiennent pas compte des variations régionales ou quotidiennes). • La comptabilisation de l'utilisation de l'énergie à la source et le changement de type d'énergie peuvent avoir un impact plus important que les technologies d'efficacité énergétique.
Net Zéro Cout	<ul style="list-style-type: none"> • Facile à mettre en œuvre et à mesurer. • Les forces du marché entraînent un bon équilibre entre les types de combustibles. • Vérifiable à partir des factures des services publics. 	<ul style="list-style-type: none"> • Peut ne pas refléter l'impact de la demande sur le réseau national. • Les taux d'énergie très volatils rendent le suivi difficile dans le temps.
Net Zéro Emissions	<ul style="list-style-type: none"> • Meilleur modèle d'énergie verte. • Tient compte des différences non énergétiques entre les types de combustibles (pollution, gaz à effet de serre). 	<ul style="list-style-type: none"> • Manque de données et de facteurs d'émission.
Net Zéro Exergie	<ul style="list-style-type: none"> • Tien compte de la qualité de l'énergie • Meilleur modèle d'énergie • Un impact environnemental complet peut être réalisé pour le bâtiment. 	<ul style="list-style-type: none"> • Difficile à utiliser pour le secteur hors recherches. • Difficile à calculer. • Manque de données.

Chaque type de Net Zéro offre une approche unique pour atteindre l'objectif, et le choix du type le plus approprié dépend des spécificités du projet et de ses objectifs. Une bonne compréhension des différents types permet aux concepteurs et aux constructeurs de prendre des décisions qui maximisent les avantages de chaque approche.

3. Métrique de la NZE

Le concept de la Net Zéro Energie (NZE) est intrinsèquement complexe, et élaborer une définition universellement applicable pour tous les cas demeure une tâche ardue. Bien que la majorité des définitions partagent des objectifs communs, elles tendent à être génériques et manquent de standardisation, s'appliquant souvent à des scénarios spécifiques en raison des variations dans les métriques utilisées pour les calculs.

En effet, de nombreuses approches existent, chacune mettant en lumière différentes métriques de la NZE, mais un consensus véritable reste à établir. Parvenir à un tel consensus serait inestimable, car il permettrait de formuler un ensemble complet de principes à prendre en compte lors de l'élaboration d'une nouvelle définition de la NZE. Un examen approfondi de la littérature existante sur ce sujet a permis d'établir la liste des métriques utilisées suivantes (Marszal et al., 2011)(Voss et al., 2011)(Sartori et al., 2012)(Sartori et al., 2010) :

3.1. Limite du système du bâtiment NZE

- **Limite physique**

La limite physique joue un rôle essentiel dans l'identification des systèmes de production énergétique "sur site". Ainsi, tout système situé à l'intérieur de cette limite est considéré comme étant sur site, tandis que ceux à l'extérieur peuvent être classés comme "hors site", différents types de limites peuvent être définis pour :

- Bâtiment isolé
- Groupe ou un cluster de bâtiments

- **Limite d'équilibrage**

La limite d'équilibrage définit quelles utilisations de l'énergie sont prises en compte lors de l'équilibrage de la NZE. Cela inclut généralement le chauffage, le refroidissement, la ventilation, l'eau chaude sanitaire, l'éclairage fixe et les charges électriques.

- **Fonction**

Une bonne métrique doit permettre une comparaison significative entre des bâtiments similaires dans des climats similaires, en prenant en compte des critères tels que :

- Le type de bâtiment : Logements et habitations, administrations, etc.
- Consommation d'énergie par personne et par mètre carré.

- **Climat et confort**

Prendre en compte toutes les notions liées aux :

- Références climatiques
- Normes de confort utilisées

3.2. Equilibrage et choix des données de la définition de la NZE

Le processus d'équilibrage de la NZE, comprenant diverses métriques, périodes et approches, joue un rôle crucial dans la réussite de ce concept. Il est essentiel de prendre en compte les éléments suivants lors de l'implémentation du concept :

- **Métrique de la NZE :**

- Énergie du site (énergie finale).
- Énergie de la source (énergie primaire).
- Coût de l'énergie et émissions énergétiques.
- Exergie.
- Aspect environnemental.

- **Période d'équilibrage de la NZE :**

- Cycle de vie
- Décennies
- Annuel
- Saisonnier
- Mensuel

- **Type d'équilibrage de la NZE :**

- Charges liées au bâtiment,
- Charges liées à l'utilisateur
- Combinaisons

- **Efficacité énergétique de la NZE :**

Une définition de la NZE peut imposer des exigences minimales obligatoires en matière d'efficacité énergétique, soit sous forme de normes, de performances, ou d'une combinaison des deux. Les exigences normatives peuvent s'appliquer aux composants de l'enveloppe, aux systèmes CVC et aux besoins en énergie. Les exigences obligatoires en matière d'efficacité énergétique peuvent être déterminées sur la base de considérations de coût-optimalité, comme dans les plans de la DPEB.

- **Hiérarchie des options d'approvisionnement de la NZE :**

Lors de l'établissement d'une définition pour la NZE, il est primordial de considérer une hiérarchie des options d'approvisionnement énergétique. Cette hiérarchie vise à établir des exigences minimales pour promouvoir une transition énergétique durable et efficiente. Deux aspects majeurs sont à prendre en compte :

- La priorité aux options d'approvisionnement sur site par rapport aux options d'approvisionnement hors site.
- La part minimale d'énergie renouvelable qui doit être utilisée pour couvrir la demande énergétique du bâtiment.

- **Système de pondération de la NZE :**

Un système de pondération est utilisé pour convertir les unités physiques des différentes sources d'énergie en une métrique uniforme, permettant une évaluation équitable de l'ensemble.

3.3. Synergie avec le réseau

Pour assurer le succès des bâtiments NZE, il est essentiel qu'ils s'intègrent harmonieusement aux réseaux énergétiques existants. La NZE dans le bâtiment doit être conçue pour être en synergie avec les réseaux et ne pas imposer de contraintes supplémentaires à leur fonctionnement, mais plutôt contribuer positivement à leur stabilité.

3.4. Procédure de suivi

Une définition de NZE doit établir des exigences minimales et des méthodes de suivi après la construction, notamment :

- Le développement de systèmes de notation et de certification énergétique.
- Un processus de mesure et de vérification (M&V) de l'énergie.

- Un processus de mesure et de vérification (M&V) prenant en compte le confort des occupants.

Une étude a été faite pour réaliser une analyse comparative des différentes approches utilisées dans le calcul du bilan d'énergie net zéro. Cette étude s'est appuyée sur les méthodologies proposées par les chercheurs participant à l'Annexe 52 "Towards Net Zero Energy Solar Building" du 40ème Exécutif du Comité d'Économie de l'Énergie dans les Bâtiments (ECBCS) de l'Agence Internationale de l'Énergie (AIE). Les méthodes numérotées de 1 à 12 ont été répertoriées dans le (Tableau 2.4) (Marszal et al., 2011).

Tableau 2.4 différentes approches utilisées dans le calcul du bilan d'énergie net zéro

Source : (Marszal et al., 2011).

	(1) Métrique de l'équilibre				(2) Période d'équilibre		(3) Type d'utilisation de l'énergie		(4) Type d'équilibre			(5) Options d'approvisionnement EnR	
	Énergie délivrée	Énergie primaire	Emissions de CO ₂	Coût de l'énergie	Annuel	Mensuel	Site	Source	Génération/ utilisation	Entrée/sortie de grille	Empreinte	Sur site	Hors site
Méthode 1		x			x			x	x		x	x	
Méthode 2		x			x			x	x		x	x	
Méthode 3		x			x			x	x		x	x	
Méthode 4	x	x	x	x	x			x	x		x	x	x
Méthode 5	x	x	x	x	x			x		x	x	x	x
Méthode 6	x					x	x		x		x	x	
Méthode 7	x	x	x		x			x	x		x	x	x
Méthode 8		x			x			x	x		x	x	
Méthode 9	x				x			x	x		x	x	x
Méthode 10		x			x		x		x		/		
Méthode 11		x			x				x		x	x	
Méthode 12		x			x				x		/		

Tahermerhamdi et al on établit aussi les indicateurs essentiels et leurs ordres pour établir la définition de la NZE (Tableau 2.5) (Taherahmadi et al., 2021).

Tableau 2.5 Indicateurs essentiels pour définir les bâtiments à énergie zéro.

Source : (Taherahmadi et al., 2021).

Étape	Indicateur
Principale	1 Dimension (énergie, environnement)
	2 Période (mois, ans ou cycle de vie)
	3 Connexion au réseau (hors réseau/sur réseau)
Subsidiaire	4 Codes de confort
	5 Limite spatiale de l'utilisation des ressources énergétiques renouvelables (approvisionnement sur site ou hors site).
	6 Type d'utilisation du bâtiment (commercial / résidentiel, bâtiment unique / bâtiment multifamilial)

4. Hiérarchie des énergies renouvelables

Le National Renewable Energy Laboratory (NREL) a publié en 2010 un rapport technique détaillant un système de classification des bâtiments NZE et leur relation avec la génération des énergies renouvelables, intitulé "Net-Zero Energy Buildings: A Classification System Based on Renewable Energy Supply Options", ce rapport a été rédigé par Shanti Pless et Paul Torcellini.

Le système de classification développé par le NREL se compose de quatre classes, désignées par les lettres A à D. Il commence par considérer les bâtiments à basse consommation énergétique, avec une réduction de la demande en énergie comme condition préalable. Ensuite, le système donne la priorité à l'application d'énergie renouvelable en fonction de son emplacement par rapport au bâtiment (Tableau 2.6) (Torcellini & Crawley, 2006) (Hootman, 2013).

Tableau 2.6 Synthèse de classes de hiérarchie des énergies renouvelables

Source : (Torcellini & Crawley, 2006)

N°	Lettre	Options de l'offre NZE	Exemples
0	Aucune	Amélioration de l'enveloppe extérieure du bâtiment par des mesures d'efficacité énergétique.	Éclairage naturel, chauffage à haut rendement, équipements de ventilation mécanique et de climatisation (CVC), ventilation naturelle, refroidissement par évaporation, etc.
Options d'approvisionnement sur site			
1	NZE A	Production d'énergie renouvelable à partir de sources situées dans l'empreinte du bâtiment.	<ul style="list-style-type: none"> • Systèmes photovoltaïques montés sur le toit ou la façade du bâtiment. • Systèmes solaires thermiques montés sur le toit ou la façade du bâtiment. • Turbines éoliennes montées sur le bâtiment ou intégrées à celui-ci.
2	NZE B	Production d'énergie renouvelable à partir de sources situées sur le site du projet. (Hors de l'empreinte du bâtiment).	<ul style="list-style-type: none"> • Systèmes photovoltaïques installés sur des aires de stationnement ou au sol. • Systèmes solaires thermiques montés au sol sur le site. • Turbines éoliennes sur des tours montées sur le site. • Biomasse récoltée sur le site et utilisée pour produire de l'énergie sur place.
Options d'approvisionnement hors site			
3	NZE C	Importation d'énergies renouvelables généré hors site avec production d'énergie sur site.	<ul style="list-style-type: none"> • Biomasse importée utilisée sur place pour la production d'électricité. • Biomasse importée et utilisée pour la production d'énergie thermique sur site.
4	NZE D	Importation d'énergies renouvelables généré hors site et utiliser directement.	<ul style="list-style-type: none"> • Electricité générer par photovoltaïque importée et utilisée directement par le bâtiment.

5. Les stratégies de la NZE 'Les étapes pour y parvenir'

La majorité des études et recherches consacrées à la réalisation des bâtiments a net zéro énergie s'inscrivent dans une approche commune. Initialement, l'accent est mis sur la réduction de la demande énergétique grâce à l'adoption de stratégies passives, suivie de l'intégration de technologies à haut rendement énergétique. Enfin, pour parvenir à un bilan énergétique équilibré, ces projets intègrent l'utilisation d'énergies renouvelables (EnR) pour couvrir les besoins énergétiques restants du bâtiment. Cette approche globale peut être synthétisée dans le (Tableau 2.7), élaboré suite à notre revue approfondie de la littérature :

Tableau 2.7 Les stratégies de la NZE étudiées par les différents chercheurs.

Source : (Auteur, 2022)

Auteur	Pays	Stratégie Passive (SP)											Active (EE)			Energie renouvelable (EnR)	Autre	Méthode		
		Orientation	Shape	Géométrie	Ventilation Nat.	Éclairage Nat.	WWR	Mur U (isolation)	Toit et sol U	Fenêtres U & Verre	Infiltration	Auvent et brise Sol	Végétation	Éclairage artificiel	HVAC				Equipment	Occupation
(Hikmat et al., 2020)	Danemark	X			X		X	X		X	X		X	X	X	X			Paysages	SP, EE
(Kibert & Fard, 2012)	Monde (Théorie)				X	X								X				X		SP, EE, EnR
(Harkouss, 2018)	Liban, France : 25 climats	X			X	X		X	X					X				PV, TV, Collecteur solaire	PCM	SP, EE, EnR
(Harkouss et al., 2019)	Indore, Tromso, Pékin																	X		EnR
(Torcellini & Crawley, 2006)	USA	X				X					X		X	X				PV		SP, EE, EnR
(Sun et al., 2018)	Singapour				X	X			X	X	X	X	X	X				PV		SP, EE, EnR
(Missoum et al., 2014)	Algérie Chlef	X						X					X					PV		SP, EE
(Szalay & Zöld, 2014)	Hongrie	X		X				X	X	X				X					Masse thermiques	SP, EE
(Attia et al., 2012)	Égypte	X	X	X	X		X	X	X	X	X	X	X	X	X	X		PV	Hauteur d'étage, nombre d'étage, surface.	Confort, SP, EE, EnR, Innovation
(Marszal & Heiselberg, 2011)	Danemark							X	X	X					X	X		PV, ST, HP	Module préfabrique, ST, PAC solaire, PAC géothermique	EE, EnR

CHAPITRE - II - BATIMENT NET ZERO ENERGIE : ENTRE DEFINITION, STRATEGIE ET COUTS

(Leckner & Zmeureanu, 2011)	Montréal, Canada.				X	X	X	X			X	X				EE, RE	
(Taherahmadi et al., 2021)	Monde (Théorie)										X	X	X	X	X	EE, RE, Application des certificats	
(El Sayary & Omar, 2021)	Monde (Théorie)														Outils BIM, Confort, innovation	SP, EE, EnR,	
(Torcellini et al., 2006)	USA			X	X							X			X		
(Li et al., 2013)	Harbin Pékin Shanghai Kunming Hong Kong				X		X	X	X		X	X	X	X	X	PV, WT, ST, HP, District H&C Masse thermique.	EE, SP, EE, EnR
(Krarti & Ihm, 2016)	MENA	X			X	X	X		X		X	X				SP, EE.	
(Cao et al., 2016)	Monde (Théorie)			X		X	X	X		X	X	X	X	X	PV, WT, géothermie, biomasses. Mur Trombe, PCM, Echangeur de chaleur, SHP, CCHP, Domotique.	SP, EE, EnR	
(Kapsalaki et al., 2012)	Stockholm Lisbonne Iraklion	X	X	X		X	X	X	X	X	X	X		PV		SP, EE, EnR	
(Oh et al., 2017)	Monde (Théorie)		X	X	X	X	X	X		X				PV, ST, WT, Géothermie	Stockage de la chaleur EnR	SP, EE, EnR	
(Mcnabb, 2013)	USA			X	X	X	X	X		X	X		X		Domotique	SP, EE, EnR	
(Morrissey et al., 2011)	Melbourne, Australie	X	X	X												SP	
(Tamene & Serir, 2019)	Algérie, Batna.					X										SP	
(Marino et al., 2017)	Italy				X											SP	
(Badeche & Bouchahm, 2020)	Alger, Biskra, Constantine, Algérie	X						X								SP	

CHAPITRE - II - BATIMENT NET ZERO ENERGIE : ENTRE DEFINITION, STRATEGIE ET COUTS

(Mastouri et al., 2017)	Maroc				X									Chanvre-gypse.	SP
(Rodriguez-Ubinas et al., 2014)	Madrid	X		X	X	X	X	X	X	X	X			Stockage de l'énergie thermique.	SP, EE
(Valladares-Rendón et al., 2017)	Climat subtropicale et tempérées	X			X	X				X				Façade auto-couverte	SP
(Louafi et al., 2007)	Constantine, Algérie	X													SP
(Aditya et al., 2017)	Monde (Théorie)				X	X	X								SP
(Hemsath & Alagheband Bandhosseini, 2015)	USA		X	X										Analyses de sensibilité. Méthode Morris.	SP
(Benharkat, 2021)	Constantine, Algérie				X									XPS	SP
(Denker, Astrid ; El Hassar, 2014)	Monde (Théorie)	X			X	X	X			X	X			PV	SP, EE, EnR
(Abanda & Byers, 2016)	UK	X													SP
(Mesloub et al., 2020)	Algérie : Climat semi-aride	X						X						PV	SP, EnR
(Alsehail & Almhafdy, 2020)	Monde (Théorie)	X			X										SP
(Albatayneh, 2021)	Amman, Jordanie	X		X	X	X	X	X	X	X				Stores de fenêtres	SP
(ABDIN et al., 2018)	Amman, Jordanie					X				X					SP
(Mahar et al., 2019)	Quetta, Pakistan				X	X	X							Masse thermiques	SP
(Badeche & Bouchahm, 2018)	Constantine, Algérie	X			X			X							SP

CHAPITRE - II - BATIMENT NET ZERO ENERGIE : ENTRE DEFINITION, STRATEGIE ET COUTS

(Vera et al., 2017)	USA et Chili															X			SP
(Nait et al., 2017)	Constantine, Algérie					X	X	X											SP
(Ali-Toudert & Weidhaus, 2017)	Alger, Ghardaïa Algérie.	X		X		X	X	X										Masse thermiques	SP
(Santos-Herrero et al., 2021)	Monde (Théorie)														X	X	Données météorologiques, gestion de l'énergie.		EE, EnR
(Ullah et al., 2021)	Monde (Théorie)					X	X	X		X	X				X		NZE Communautés, Atténuation de la source de chaleur extérieure.		PS, EE, EnR
(Wei & Skye, 2021)	Monde (Théorie)	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X				PS, EE, EnR
(Sotehi et al., 2020)	Alger, Ouargla, Constantine, Algérie.					X		X										Mur Trombe	PS
(Piselli et al., 2021)	Italie														X				EE
(Bahria et al., 2016)	Alger, Djelfa, Tamanrasset, Algérie														X		Systèmes de chauffage et de refroidissement solaires		EE, EnR
(Errebai et al., 2021)	11 Villes, Algérie					X	X												PS
(Tarabieh et al., 2017)	MENA							X											PS
(Derradji et al., 2017)	Alger					X											Brique de terre stabilisée		PS
(Musall et al., 2016)	Monde (Théorie)	X		X	X	X	X	X	X	X	X	X					PV, ST, WT, biomasse, (fossile/biomasse)	Masse thermique, récupération de la chaleur	PS, EE, EnR
(Attia et al., 2012)	Monde (Théorie)																	Confort, innovation	PS, EE, EnR
(Harkouss, 2018)	Monde (Théorie)	X	X	X	X	X	X	X		X	X	X					PV, ST, WT, Géothermie, Biomasse, CHP		PS, EE, RE

Le tableau précédent, visant à fournir les différentes stratégies de la net zéro énergie, peut être succinctement résumé par le schéma suivant (Figure 2.2) :

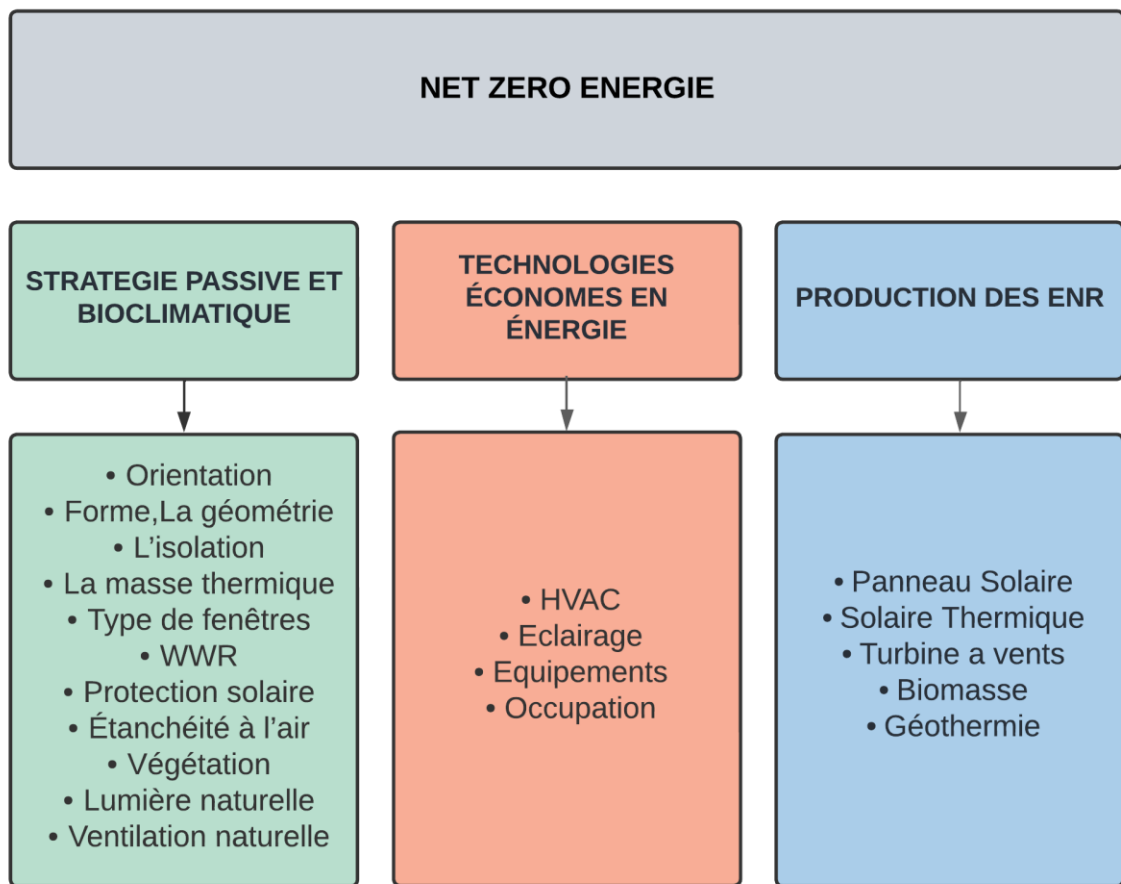


Figure 2.2 Résumé des différentes stratégies pour atteindre la net zéro énergie

Source : (Auteur, 2023)

6. Indices de la NZEB

Dans cette section, quelques indices de performance utilisés pour évaluer la performance et l'efficacité énergétique des bâtiments sont présentés comme exemple.

6.1. Indices de performance Zéro énergie (zEPI)

Le zEPI constitue une échelle de mesure de la performance énergétique d'un bâtiment, en établissant des objectifs énergétiques alignés sur ceux d'un bâtiment typique à faible consommation énergétique situé dans le même climat. Son calcul est basé sur l'équation 2.8, où un score zEPI de '0' correspond à un Bâtiment NZE, tandis qu'un score de '100' indique un bâtiment construit conformément aux critères de consommation d'énergie des codes du bâtiment des États-Unis d'Amérique (Figure 2.3) (NBI, 2015).

$$zEpi = 100 \times \frac{EUI_a}{EUI_r} \quad (2.8)$$

Avec,

EUI_a (kWh/an.m²) est l'indice d'utilisation énergétique annuelle du bâtiment comportant la somme de toutes les factures (gaz, électricité importée ou exportée) divisée par la surface au sol du bâtiment.

EUI_r (kWh/an.m²) est l'indice annuel de référence de la consommation énergétique dérivé des tableaux de l'enquête sur la consommation énergétique des bâtiments (CBECS).

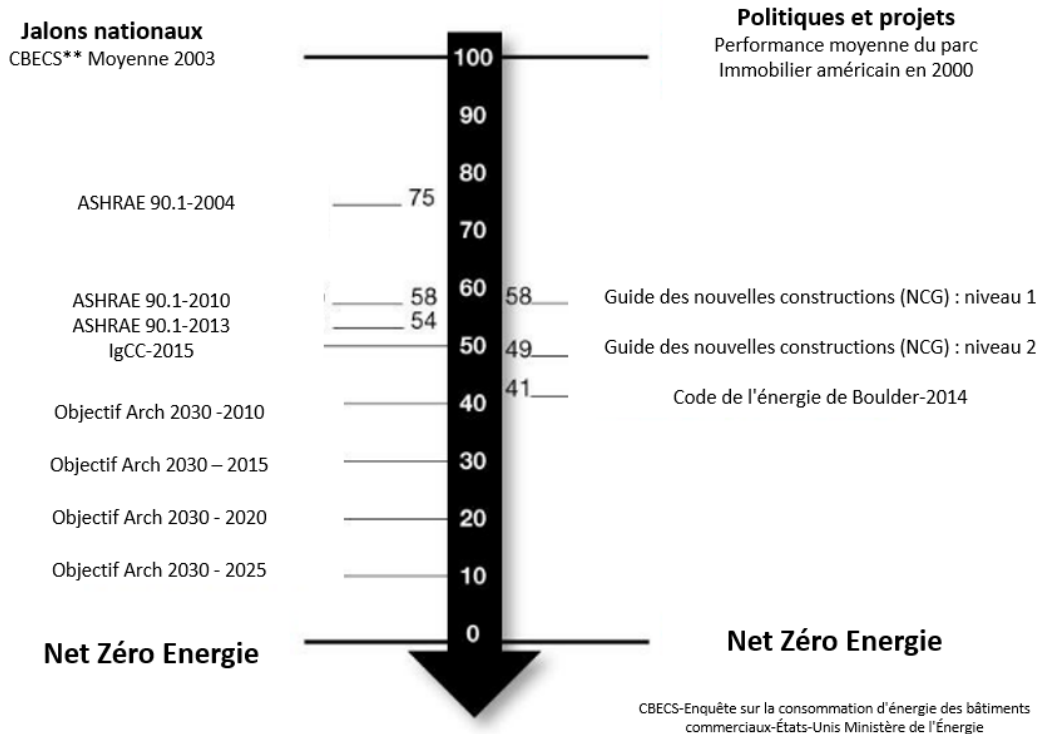


Figure 2.3 Échelle zEPI vers NZE

Source : (NBI, 2015).

6.2. Indice HERS

L'indice HERS est calculé à la base d'une analyse approfondie de la performance énergétique d'une maison qui permet de déterminer son efficacité énergétique. Chaque

maison cotée HERS reçoit une note HERS en fonction de son rendement. Un évaluateur d'énergie HERS certifié évalue l'efficacité énergétique d'une maison et lui attribue une note de performance relative. Plus le chiffre est bas, plus la maison est efficace sur le plan énergétique (HERSIndex, 2021). Une maison dont l'indice HERS est de 65 est 35% plus économe en énergie qu'une maison neuve standard, une maison dont l'indice HERS est de 130 est 30 % moins économe en énergie qu'une maison neuve standard (Figure 2.3).

7. Cout et Net zéro énergie

Un bâtiment résidentiel fait appel à une diversité d'éléments de construction dans sa conception, impliquant un arrangement complexe de matériaux fabriqués à l'aide de diverses technologies afin de répondre aux exigences environnementales, énergétiques et législatives. Les matériaux de construction sont issus d'un large éventail de ressources et sont produits à travers des processus énergivores, engendrant des émissions et des déchets solides, dès l'extraction des matières premières jusqu'à leur fin de vie (Islam et al., 2015). L'importance des coûts associés à ces différentes étapes est souvent citée comme l'une des raisons de la résistance du secteur du bâtiment au changement : "Le secteur du bâtiment accorde une grande importance aux coûts et a tendance à privilégier les matériaux et les procédés à faible coût, tout en faisant preuve de réticence face au changement et à l'innovation perçus comme risqués" (Morrissey et al., 2011). Les coûts initiaux et autres considérations liées aux coûts (par exemple, la formation des employés, le transport, etc) représentent l'un des plus grands obstacles à la promotion des bâtiments à énergie zéro. Malheureusement, il existe peu d'études qui ont examiné les différentes barrières de coûts dans ce domaine (Hu, 2019) (Albadry et al., 2017) (Nduka et al., 2019) (Taherahmadi et al., 2021). Ainsi, il est impératif de démontrer aux investisseurs du secteur du bâtiment que les Bâtiments NZE peuvent être réalisés sans coût supplémentaire (Torcellini et al., 2014).

La compilation d'études présentées offre des informations précieuses sur les principaux indicateurs financiers tels que le retour sur investissement, la valeur actuelle nette et les coûts

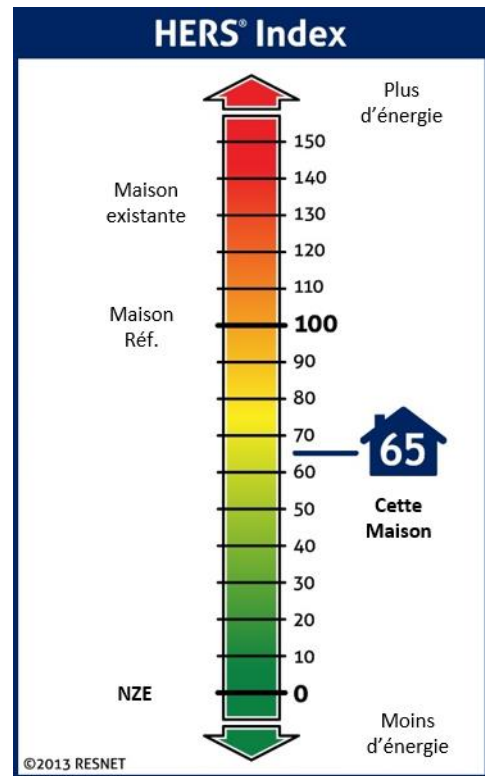


Figure 2.4 L'échelle de notation du HERS

Source : (HERSIndex, 2021).

du cycle de vie, associés à différentes approches visant à améliorer l'efficacité énergétique des bâtiments (Tableau 2.8).

Tableau 2.8 Principaux indicateurs financiers de la NZE

Source : (Auteur, 2022)

Étude	Indicateurs financiers
(Song et al., 2010)	L'objectif de cette étude est de calculer le retour d'investissement, le taux de rendement, la valeur actuelle nette (NPV) et le coût de vie de différentes alternatives permettant d'améliorer l'efficacité énergétique.
(Leckner & Zmeureanu, 2011)	On a estimé que le retour d'investissement pour atteindre les NZEH à Montréal est d'environ 8,4 à 8,7 ans. Mais en raison du faible coût de l'électricité à Montréal et du coût élevé des technologies d'énergie solaires, la récupération financière ne peut être atteinte et dépasse le temps de garantie de ces équipements.
(Marszal & Heiselberg, 2011)	Les mesures d'efficacité énergétique sont plus rentables que les technologies EnR, par conséquent, l'auteur recommande de réduire la consommation d'énergie au minimum avant d'utiliser les énergies renouvelables. Les auteurs affirment aussi que l'utilisation de bâtiments modulaires préfabriqués à un grand potentiel dans l'amélioration des propriétés thermiques des bâtiments avec un bon coût. Et que les EnR hors site sont plus rentables que les EnR générant sur site.
(Torcellini & Pless, 2012)	Assure qu'il est désormais possible d'obtenir la certification LEED Platinum et le statut NZE sans augmenter les coûts initiaux de construction.
(Missoum et al., 2016b)	Avec leurs études sur le Nord algérien, cite que la conversion des maisons bioclimatiques en maisons à énergie zéro est faisable mais avec des périodes de retour sur investissement très longues. La période de retour sur investissement pour le système PV et le système de chauffage solaire peut être entre 30 et 40 ans. Ces mesures peuvent être réalisables et rentables si : - Les prix de l'électricité et du gaz sont multipliés par 2 et 3 respectivement. - Coût des installations réduit à moitié.
(Krarti & Ihm, 2016)	A trouvé que les mesures d'efficacité énergétique peuvent réduire d'au moins 50% l'énergie annuelle. Mais cela dépend fortement des prix de l'énergie et des coûts de mise en œuvre, et il a constaté que la meilleure politique pour promouvoir les NZE est de supprimer les subventions énergétiques dans les régions MENA.
(Sun et al., 2018)	Affirme que les NZE ont une longue période de retour sur investissement et à calculer le retour d'investissement pour : - Les stratégies d'efficacité énergétique passive (verre haute performance à faible valeur U, conduits de lumière, étage de lumière, contrôles d'éclairage, ventilation solaire) : plus de 100 ans en moyenne. - Les stratégies d'efficacité énergétique active (LED et autres types d'éclairages, climatisation économe en énergie avec ventilateur à vitesse variable, système de ventilation double, serpentin avec ventilation à la demande, ventilation individuelle avec système de distribution d'air par le sol) ont de 5.4 ans en moyenne.
(Hu, 2019)	Sur la base de sa comparaison de douze bâtiments NZE et conventionnels aux États-Unis, il a conclu qu'il n'y a pas de différence significative entre leurs coûts de construction

7.1. Analyse financière

7.1.1. Retour sur investissement (ROI)

Le retour sur investissement (ROI) est l'une des analyses financières les plus simples pour évaluer une décision d'investissement dans un projet. Il désigne la période de temps en années nécessaires pour récupérer le montant de l'investissement initial. Cependant, il comporte certaines limitations car, il exclut les paiements futurs tels que les coûts de remplacement, etc. Pour pallier ces limitations, il est préférable d'utiliser un retour sur

investissement modifié qui inclut les données manquantes (National Renewable Energy Laboratory, 2023).

L'équation 2.9 peut être utilisée pour calculer le retour sur investissement modifié, où I représente l'investissement initial (modifié) et S les économies de coûts par an :

$$ROI = \frac{I}{S} \quad (2.9)$$

7.1.2. Valeur Nette Actuelle (NPV)

La valeur nette actuelle (NPV) est directement liée au concept de la valeur temporelle économique. La NPV est la valeur actuelle totale des économies de coûts futures sur une période donnée, soustraite de l'investissement initial. Il s'agit de la valeur nette de tous les coûts et gains exprimés en valeur actuelle. Avec la valeur temporelle économique, les flux monétaires futurs doivent être actualisés pour les exprimer en termes de valeur actuelle. Le calcul de la NPV est plus complexe que les simples calculs de rentabilité et de retour sur investissement. L'équation 2.10 est utilisée pour calculer la valeur actuelle (PV), où S_t est la valeur future du flux de trésorerie de l'épargne pendant la période (t) analysée, et d est le taux d'actualisation (Hootman, 2013) (Dylewski, 2019) (National Renewable Energy Laboratory, 2023).

$$PV = \frac{S_t}{(1 + d)^t} \quad (2.10)$$

La valeur actuelle sur plusieurs périodes de temps peut être calculée en additionnant la valeur actuelle nette de chaque période de temps.

$$PV = \frac{S_1}{(1 + d)^1} + \frac{S_2}{(1 + d)^2} + \frac{S_3}{(1 + d)^3} \quad (2.11)$$

Où :

$$PV = \sum_{t=1}^n \frac{S_t}{(1 + d)^t} \quad (2.12)$$

L'équation doit être étendue pour inclure le nombre total de périodes de temps analysées. Pour une valeur actualisée sur 10 ans, l'équation sera développée jusqu'à $t = 10$. La valeur actuelle de la période initiale est l'investissement initial. Soustrayez l'investissement initial de la valeur actuelle de toutes les économies ou gains futurs additionnés pour obtenir la valeur actuelle nette (NPV).

$$PV = I_0 \quad (2.13)$$

$$NPV = PV - PV_0 \quad (2.14)$$

7.1.3. Analyse du coût du cycle de vie (LCC)

L'analyse du coût du cycle de vie (LCC) est un moyen efficace de déterminer l'impact réel sur les coûts de toute décision relative à un projet, particulièrement utile pour prendre des décisions en matière d'efficacité énergétique et d'énergies renouvelables. La LCC est le coût total sur la durée de vie d'un produit, d'un matériau, d'un système ou d'un bâtiment, du berceau à la tombe. Il faut tenir compte du coût initial et des coûts d'exploitation, de maintenance, de remplacement et de fin de vie. L'analyse LCC est l'un des outils comparant les différentes alternatives de projet, car elle est axée sur la rentabilité globale. L'utilisation de la valeur actuelle est importante dans l'analyse LCC, car toutes les valeurs futures doivent être actualisées en valeur actuelle. L'équation 2.15 est utilisée pour son calcul (Harkouss, 2018) (National Renewable Energy Laboratory, 2023):

$$LCC = C + E_{pv} + M_{pv} + R_{pv} + O_{pv} - S_{pv} \quad (2.15)$$

Avec :

C Coût initial du capital ou de l'investissement.

E_{pv} Valeur actuelle des coûts énergétiques.

Le coût doit inclure les taux d'augmentation de l'énergie. Pour l'analyse des systèmes d'énergie renouvelable, la production d'énergie peut produire une valeur négative ou un crédit pour les coûts énergétiques.

M_{pv} Valeur actuelle des coûts de maintenance.

R_{pv} Valeur actuelle des coûts de remplacement.

Généralement, cela inclut le remplacement des pièces, qui peut être ajouté facultativement aux coûts de maintenance. Si la période d'analyse est plus longue que la durée de vie du système évalué, les coûts de remplacement doivent inclure la totalité des coûts de remplacement.

O_{pv} Valeur actuelle des autres coûts optionnels ou de la valeur ajoutée, qui peuvent inclure des coûts financiers ou autres.

S_{pv} Valeur actuelle de récupération en fin de vie.

Il existe plusieurs approches et versions de cette équation de base, en fonction des paramètres inclus dans l'analyse, et que la période de temps correspond à la durée de vie estimée du système évalué.

L'analyse du coût du cycle de vie est un processus nettement différent de l'analyse du cycle de vie (LCA). L'LCA est une mesure de l'impact environnemental d'une décision de projet sur la durée de vie de l'alternative. L'énergie intrinsèque est souvent un résultat mesurable d'une analyse du cycle de vie.

7.1.1. Coûts liés à l'énergie

Les coûts liés à l'énergie englobent les dépenses résultant de l'utilisation de diverses sources d'énergie dans le bâtiment, en lien avec les différentes activités quotidiennes des résidents. Ces coûts comprennent principalement les dépenses associées au chauffage de l'espace, au chauffage de l'eau, à la ventilation et à l'éclairage. Ils sont une mesure importante de la consommation énergétique et jouent un rôle crucial dans l'évaluation de l'efficacité énergétique et des performances globales du bâtiment. Les coûts liés à l'énergie sont donc un aspect clé à considérer lors de la prise de décisions concernant la conception, la gestion et l'optimisation des bâtiments en vue de réduire leur empreinte environnementale et de favoriser une utilisation énergétique plus durable (National Renewable Energy Laboratory, 2023).

7.1.2. Valeur temporelle de l'argent

L'élément temps est un élément important pour déterminer la valeur économique et évaluer les différentes alternatives financières dont on dispose. Le principe de la valeur temporelle économique peut être expliqué simplement en disant qu'une somme d'argent aujourd'hui vaut plus que la même somme d'argent à un moment donné dans le futur. La prise en compte de la valeur temporelle économique dans les analyses financières, pour guider les décisions relatives aux projets et à l'énergie, augmentera la qualité et le niveau de précision de l'évaluation et de l'étude. Les deux principaux concepts de la valeur temporelle

sont la valeur actuelle et la valeur future. La valeur future est la valeur d'une somme d'argent actuelle sur une période donnée en utilisant un taux d'actualisation. Par exemple, 1 000 Dinars Algérien investis pendant un an à un taux d'actualisation de 5 % auront une valeur future de 1 050 Dinars dans un an. La valeur actuelle est le même concept, mais à l'envers en partant d'une valeur future de l'argent et en l'actualisant à l'aide d'une période et d'un taux d'actualisation spécifiques (Teotónio et al., 2021) (Missoum et al., 2016a) (Islam et al., 2015).

8. Adaptation de la définition

Pour parvenir à une définition normalisée de la NZE, il est essentiel de consolider tous les éléments utilisés par les différents chercheurs et entités. Plutôt que de diviser chaque catégorie en une définition spécifique, une approche plus appropriée consisterait à créer un ensemble de critères englobant tous les types de net zéro. Cette approche nécessiterait l'utilisation de coefficients et de pondérations qui permettent d'adapter la définition en fonction des besoins spécifiques de chaque utilisateur. En intégrant les diverses perspectives et en tenant compte des spécificités des différents projets, une définition normalisée de l'énergie net zéro pourrait mieux répondre aux exigences actuelles des parties prenantes impliquées dans ce domaine.

Après une analyse approfondie de la littérature existante, il est possible de résumer et de proposer une définition plus complète qui englobe la majorité des concepts traités par les différents chercheurs. Cette définition peut être synthétisée par le schéma suivant (Figure 2.5) :

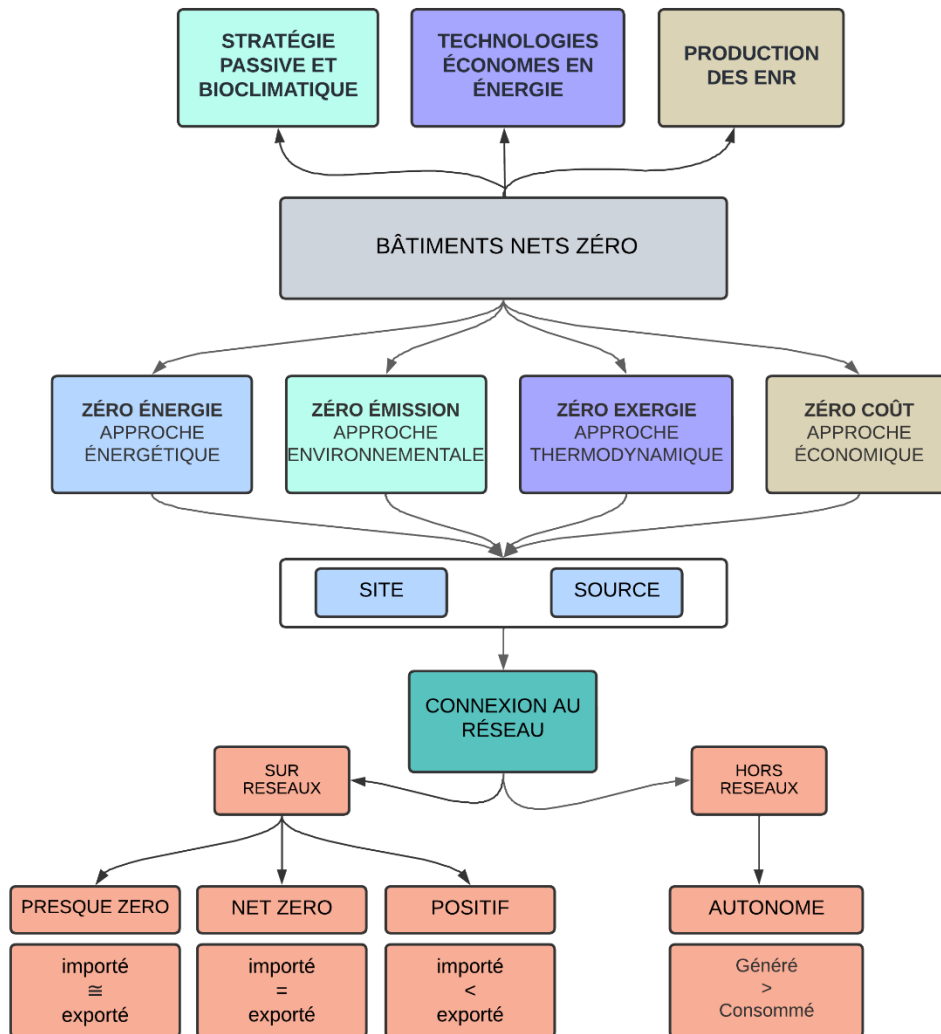


Figure 2.5 Résumé de la définition de la NZE

Source : (Auteur, 2022)

En Algérie, il apparaît clairement que l'attention doit être portée sur deux aspects essentiels liés à l'énergie et aux coûts dans le contexte de l'objectif de construire des bâtiments NZE. Ainsi, le schéma élaboré précédemment peut être appliqué en mettant l'accent sur ces deux catégories principales, tout en allouant des points supplémentaires aux utilisateurs qui parviennent à atteindre les autres catégories. Par exemple, en se fixant comme objectif d'atteindre une consommation d'énergie net zéro avec des coûts optimaux et en privilégiant l'utilisation d'énergies renouvelables (EnR), une notation spécifique peut être élaborée pour évaluer la réussite de cet objectif particulier. Ce processus permettra ainsi de

mieux répondre aux besoins et aux objectifs spécifiques de l'Algérie concernant les bâtiments à consommation d'énergie net zéro (Figure 2.6).

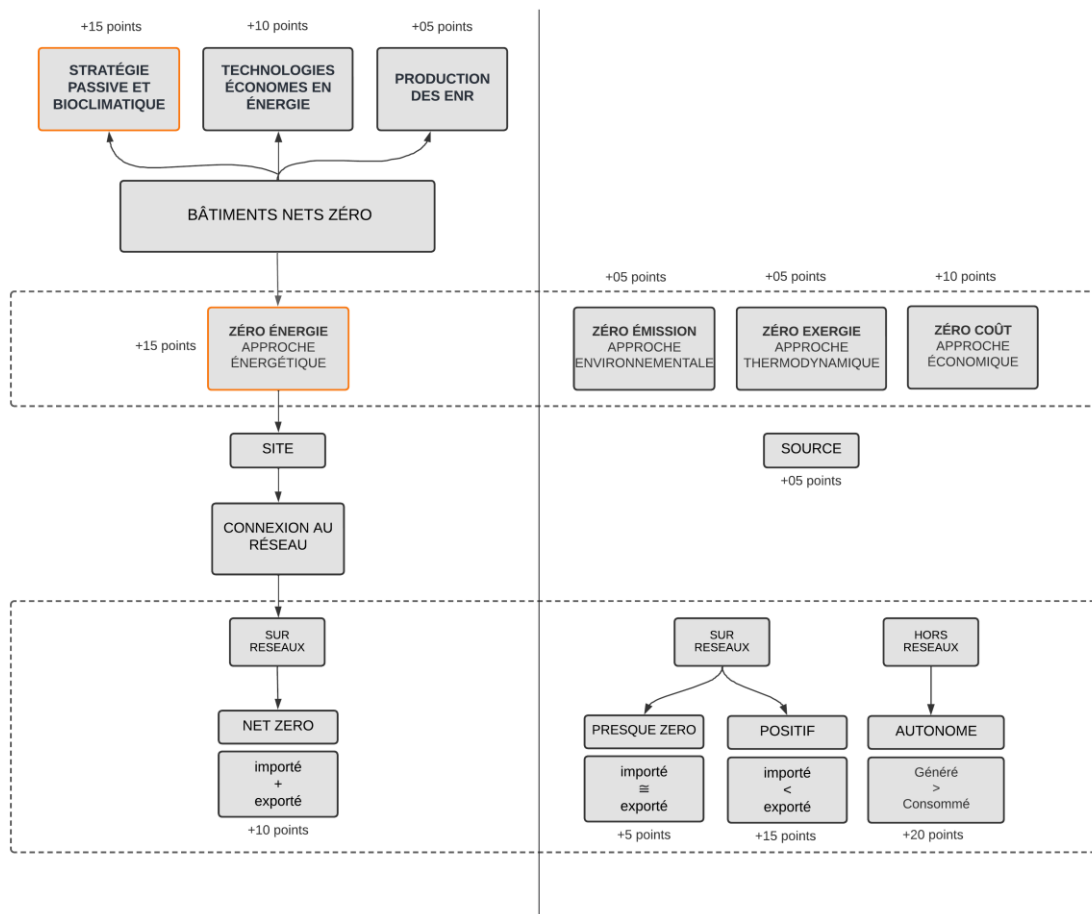


Figure 2.6 Exemple d'adaptions de la définition avec un système de points

Source : (Auteur, 2022)

Afin de se conformer à la certification Net Zéro, dans cet exemple, il est impératif d'atteindre un score minimum de 50 points. À cette fin, les éléments présentés sur la gauche du schéma sont considérés comme des conditions préalables, tandis que ceux affichés sur la droite sont considérés comme des avantages supplémentaires. Les éléments marqués en orange sont obligatoires. Il est essentiel de noter que le schéma proposé est présenté à titre d'exemple et que son utilisation requiert une analyse approfondie et contextualisée (Figure 2.6).

Conclusion

À la suite d'une analyse approfondie de la littérature sur les bâtiments à net zéro énergie, il est manifeste que le concept a évolué vers une idée plus conceptuelle des "bâtiments à net zéro énergie", englobant tous les éléments utilisant l'énergie dans un bâtiment et visant à atteindre l'équilibre entre la production d'énergie renouvelable et la consommation énergétique. Au sein de ces définitions, quatre catégories fondamentales se dégagent : énergie, émissions, exergie et coûts, chacune étant assortie de métriques spécifiques destinées à préciser et à affiner le concept. De plus, une structure hiérarchique régit l'intégration des options relatives aux énergies renouvelables, délimitant ainsi les solutions sur site et hors site. Ce chapitre, à travers les différentes méthodologies et définitions utilisées par les chercheurs de données, nous a permis d'explorer les différentes approches facilitant l'atteinte de la NZE, clairement divisées en trois stratégies majeures : premièrement, réduire la demande énergétique grâce à des stratégies de conception passive ; deuxièmement, mettre en œuvre des technologies énergétiques hautement efficaces ; et troisièmement, intégrer des sources d'énergie renouvelable (EnR) pour fournir l'énergie restante nécessaire au fonctionnement du bâtiment.

L'examen approfondi effectué sur l'aspect financier dans ce chapitre a clairement démontré son importance, car les préoccupations budgétaires dans le domaine de la construction sont souvent identifiées comme l'une des raisons sous-jacentes à la résistance à l'égard de la transition vers un horizon plus soutenable.

Cependant, en raison du nombre important de métriques et de la complexité de la hiérarchie utilisée, cette recherche a identifié plus de 70 définitions différentes, mettant ainsi en lumière le manque d'une définition plus globale et standardisée de ce concept pouvant servir de point de comparaison entre les différents bâtiments à net zéro énergie. Qui a été traité par la suite avec le développement d'un schéma cohérent regroupant toutes les données pertinentes pour créer une définition plus précise de la NZE. Cette définition peut être adaptée au contexte spécifique de l'Algérie, permettant ainsi au pays de mieux répondre à ses besoins et objectifs uniques en matière de bâtiments à net zéro énergie, contribuant ainsi à la transition vers un environnement bâti plus durable et respectueux de l'environnement.

**CHAPITRE - III - LE BATIMENT
RESIDENTIEL ALGERIEN AU CŒUR
DE LA TRANSITION ENERGETIQUE**

Introduction

*« Le bâtiment le plus écologique est celui
qui est déjà construit »*

— Carl Elefante

Pour relever les divers défis environnementaux et œuvrer en faveur d'un développement plus durable, le concept de transition énergétique a émergé comme un pivot central dans cette entreprise. La transition énergétique, de manière simplifiée, englobe le passage de l'utilisation des énergies fossiles non renouvelables vers les énergies renouvelables et durables. Cette transition représente une réponse cruciale aux préoccupations pressantes liées au changement climatique, et son urgence découle de la nécessité de préserver les ressources naturelles pour les générations présentes et futures.

La vaste majorité des nations à travers le globe s'efforcent de réduire leur consommation énergétique et d'améliorer leur efficacité énergétique, et l'Algérie ne fait pas exception. Le pays reconnaît la nécessité d'une stratégie énergétique plus équilibrée et consciente de l'environnement. Son alignement avec les accords internationaux, y compris les Accords de Paris, reflète son engagement envers un avenir plus écologique. En effet, l'Algérie a mis en place plusieurs programmes visant à développer ces concepts et à promouvoir les énergies renouvelables. Parallèlement, elle diversifie son mix énergétique afin de réduire les risques liés à la dépendance envers les énergies fossiles, avec des implications allant des vulnérabilités économiques aux répercussions environnementales. Le secteur du bâtiment, en raison de son potentiel significatif dans cette transition énergétique, se trouve au cœur de ce chapitre. Son objectif principal est de fournir un aperçu global de ce secteur ainsi que de son potentiel d'adaptation au concept de la net zéro énergie.

Aligné sur ces aspirations, l'objectif fondamental de ce chapitre est d'examiner en détail et de présenter une vue d'ensemble de la transition énergétique en Algérie. Pour ce faire, il commence par définir les fondements de l'énergie, puis analyse la production, les réserves et la consommation d'énergie en Algérie. L'analyse se concentre sur différents types de ressources fossiles, tels que le pétrole et le gaz naturel, qui sont largement utilisés, ainsi que sur l'utilisation et le potentiel des énergies renouvelables telles que le solaire, l'éolien, la géothermie, la biomasse et l'hydroélectricité, qui sont toutes disponibles sur le territoire algérien. Une attention particulière est accordée à la relation entre l'énergie et l'environnement, avec un accent sur les émissions de CO₂. Le chapitre examine également la politique d'efficacité énergétique de l'Algérie, en analysant à la fois son cadre

réglementaire et institutionnel. De plus, il explore l'évaluation actuelle du secteur du bâtiment ainsi que son potentiel à mettre en place de nouveaux instruments, tels que des normes, pour promouvoir l'efficacité énergétique dans ce domaine. Enfin, le chapitre se penche sur les connaissances, les attitudes et les perceptions des professionnels en ce qui concerne l'efficacité énergétique, les énergies renouvelables, le changement climatique et le concept de net zéro énergie dans le contexte de la construction.

Dans son ensemble, ce chapitre offre une vue exhaustive du paysage énergétique algérien et met en évidence les opportunités qu'il offre pour la mise en œuvre du concept de net zéro énergie dans le secteur du bâtiment.

1. Les bases de l'énergie

1.1. Définition de l'énergie

L'énergie peut changer de forme, mais elle est toujours conservée, il existe deux types d'énergie cinétique et potentielle, l'énergie cinétique (mouvement, thermique, radiante, sonore) est l'énergie qui effectue un travail, l'énergie potentielle (électrique, gravitationnelle, nucléaire, chimique, mécanique) est une énergie stockée (Larousse, 2023). L'énergie, est exprimé avec l'unité du Système international d'unités (SI), le joule (J), Un joule est un newton de force appliquée sur un mètre de distance. Un joule correspond également à une puissance de 1 watt pendant une seconde, Pour conceptualiser l'unité d'un joule : elle est approximativement égale à l'énergie nécessaire pour soulever une petite pomme à la hauteur d'un mètre (Hootman, 2013).

La puissance est le taux de transfert d'énergie. C'est l'énergie divisée par le temps et, par conséquent, c'est une mesure instantanée, L'unité du SI de la puissance est le joule par seconde (J/s), soit un watt (W). Le mégawattheure (MWh) et le gigajoule (GJ), sont des unités courantes de l'énergie, utilisées pour décrire la consommation totale d'énergie dans les bâtiments (Hootman, 2013). Une ampoule de 100 watts allumée pendant une heure aura consommé une quantité d'énergie de 360 000 joules (100 W x 3600 s). Cela équivaut à une consommation d'énergie de 0,1 kWh (360 000 J ÷ 3 600 000 J/kWh), Allumée 10 heures par jour pendant un an, cela représente une consommation d'énergie de 365 kWh (0,1 kWh x 10 h x 365 jours), si l'on suppose qu'un appartement est constitué de 6 espaces chacun nécessitant une ampoule la consommation totale pour un an s'élèvera à 2190 kWh (0,1 kWh x 10 h x 365 jours x 6 espaces).

Tableau 3.1 Unité de conversion principale

Source : unitconverters.net

	kWh	MWh	J	MJ	GJ	Btu
kWh	1.0×10^0	1.0×10^{-3}	3.6×10^6	3.6×10^3	3.6×10^{-3}	3.41214×10^6
Wh	1.0×10^3	1.0×10^{-3}	3.6×10^3	3.6×10^0	3.6×10^{-6}	3.412×10^3
MWh	1.0×10^3	1.0×10^0	3.6×10^9	3.6×10^6	3.6×10^0	3.41214×10^9
J	2.7778×10^{-4}	2.7778×10^{-10}	1.0×10^0	1.0×10^{-3}	1.0×10^{-9}	9.47817×10^{-4}
MJ	1.0×10^{-1}	1.0×10^{-4}	1.0×10^6	1.0×10^0	1.0×10^{-3}	9.47817×10^2
GJ	1.0×10^3	1.0×10^{-1}	3.6×10^9	3.6×10^6	1.0×10^0	9.47817×10^8
Btu	2.93071×10^{-4}	2.93071×10^{-7}	1.05506×10^3	1.05506×10^0	1.05506×10^{-3}	1.0×10^0

1.2. Quantifier l'utilisation de l'énergie dans les bâtiments

1.2.1. Energie du site

Elle équivaut à l'énergie enregistrée par le compteur électrique d'un bâtiment et inscrite sur les factures d'électricité (Figure 3.1). L'énergie du site constitue également la mesure énergétique généralement prise en compte dans la plupart des logiciels de modélisation énergétique durant la phase de conception d'un bâtiment. Prenons l'exemple d'un bâtiment utilisant à la fois l'électricité et le gaz naturel comme sources énergétiques. Dans ce cas, la somme des consommations du bâtiment équivaut au total de l'énergie du site, et cette valeur est reflétée sur les compteurs de consommation ainsi que sur la facture d'électricité (Øvergaard, 2008).

1.2.2. Energie source/primaire

L'énergie source, également désignée sous le terme d'énergie primaire, représente l'énergie mesurée à sa source originelle. Elle intègre toutes les éventuelles pertes et dépenses additionnelles d'énergie nécessaires pour approvisionner le site en question. Pour poursuivre avec l'exemple du bâtiment, il conviendrait d'ajouter les diverses déperditions inhérentes à la production de cette énergie (Figure 3.1), et cette mesure serait évaluée au niveau de l'usine de génération d'énergie. Il est à noter que cette métrique est plus complexe à calculer (Øvergaard, 2008).

1.3. Énergie et carbone

L'un des avantages prééminents de la conception de la net zéro énergie dans le bâtiment réside dans sa capacité à atténuer les émissions de gaz à effet de serre engendrées par le secteur du bâtiment. Ce secteur joue un rôle central dans le panorama global des émissions de gaz à effet de serre. Les gaz à effet de serre (GES) (Tableau 3.2), communément désignés sous le terme "émissions de carbone", sont responsables de l'accroissement du piégeage thermique atmosphérique par le biais de l'effet de serre. Pour simplifier, une notation

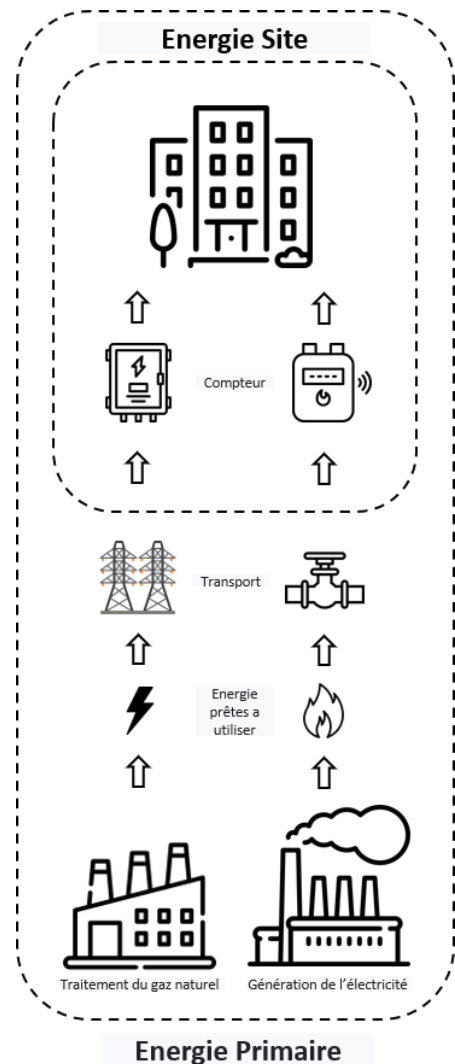


Figure 3.1 schéma expliquant l'énergie source et site

Source : (Auteur, 2022)

spécifique a été élaborée : le dioxyde de carbone équivalent, ou CO₂e. Cette approche vise à exprimer le potentiel de réchauffement planétaire inhérent à l'ensemble des gaz à effet de serre, en termes d'une quantité équivalente de dioxyde de carbone. Il est incontestable que le secteur du bâtiment porte une part substantielle de responsabilité dans les émissions de carbone (COP 3, 1997) (COP26, 2021).

Tableau 3.2 Statistiques des émissions de gaz à effet de serre pour le monde entier et en Algérie

Source : (Climatewatchdata, 2023)

Secteur	Gaz	Algérie (MtCO ₂ e)	Monde (MtCO ₂ e)
Bâtiment	Tous les GES	27.13	3065.31
	CO ₂	27.05	2794.16
	CH ₄	0.06	234.81
	N ₂ O	0.02	36.34

1.4. Intensité de la consommation énergétique

L'intensité de la consommation d'énergie (EUI) semble être l'une des mesures les plus importantes dans la conception de bâtiments NZE. L'EUI est une mesure de la consommation annuelle totale d'énergie du bâtiment divisée par la surface brute du bâtiment. Il peut être exprimé en termes d'énergie du site ou d'énergie source (Hootman, 2013). L'unités courantes de l'indice est le kWh/an/m². La comparaison est moins utile lorsqu'il s'agit de comparer des bâtiments de différents climats ou de différents types. Les variations de climat et de programme peuvent entraîner une consommation d'énergie très différente. Par conséquent, il est plus significatif de comparer des bâtiments de même type et dans le même climat. Cela ne veut pas dire, cependant, qu'il n'y aura pas de différences importantes entre des bâtiments de même type et de même climat. Lorsqu'on fixe un objectif d'énergie, il doit être faisable, soit en termes de coût ou de technologie actuelle, les deux doivent être fortement pris en compte.

1.4.1. Énergie et type de bâtiment

De la même manière que le climat influence les charges énergétiques au niveau de l'enveloppe du bâtiment, le type du bâtiment influe sur les charges internes. Le type de bâtiment, ou l'activité principale qui y prédomine, détermine les plages horaires, les densités d'occupation, les diverses charges électriques pour les prises et les processus, les besoins en eau chaude sanitaire et en refroidissement des équipements, ainsi que l'apport de chaleur interne dû à l'éclairage. Ces charges exercent une influence substantielle sur la consommation énergétique d'un bâtiment. De manière globale, le type de construction peut engendrer un impact bien plus significatif sur la consommation d'énergie que le climat. De

surcroît, tandis que le climat peut généralement être pris en considération dans la conception de l'enveloppe extérieure, les charges associées au type de bâtiment peuvent s'avérer plus complexes. Cela est dû en partie au fait que le comportement humain, plus aléatoire et difficile à réguler, entre en jeu (Andersen & Velux, 2014)(IEA, 2021).

1.5. Physique énergétique du bâtiment

1.5.1. Science de la conception

La compréhension des paramètres et formules de base qui régissent les flux de chaleur dans les bâtiments constitue la base de l'application de stratégies passives et de systèmes à faible consommation énergétique aux bâtiments NZE. Plus important encore, ces informations donnent au concepteur un large aperçu de toutes les variables qui entreront en jeu lors de la modélisation énergétique et de la conception des systèmes du bâtiment. Ces concepts et des calculs simples peuvent être utilisés pour tester rapidement différentes décisions de conception, en particulier celles qui concernent l'enveloppe du bâtiment (Andersen & Velux, 2014) (Hootman, 2013) (Figure 3.2).

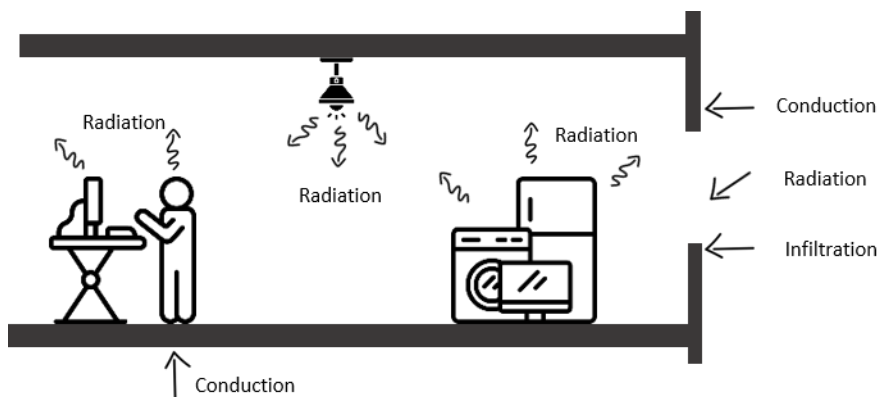


Figure 3.2 Charges d'énergie thermique dans les bâtiments

Source : (Auteur, 2022)

1.5.2. Le bilan énergétique

L'objectif sous-tendant le bilan énergétique au sein des bâtiments vise à évaluer tant leur consommation énergétique que leur empreinte environnementale. Cette évaluation peut s'étendre sur des périodes de courte durée, de longue durée ou même englober l'ensemble du cycle de vie du bâtiment. Il devient impératif d'effectuer une évaluation et de procéder à un bilan énergétique avant l'amorce de la construction d'une NZEB. Cette évaluation s'opère au moyen de logiciels de simulation, lesquels permettent d'appréhender approximativement tous les paramètres essentiels en amont de la phase de construction (International Energy Agency, 2021) (Pullen, 2000).

Ces bilans énergétiques trouvent une utilisation prédominante dans divers contextes, notamment :

- La réalisation d'un bilan pour évaluer le coût du cycle de vie (LCC).
- L'évaluation de l'impact environnemental engendré par le bâtiment.
- L'évaluation des besoins énergétiques requis pour le fonctionnement continu du bâtiment.
- L'identification d'opportunités d'optimisation visant à améliorer les performances énergétiques du bâtiment.

1.5.3. Propriétés du flux thermique des matériaux

L'analyse approfondie des grandeurs thermiques spécifiques aux différents matériaux joue un rôle fondamental dans la détermination des performances thermiques des bâtiments et des matériaux qui les composent. En considérant ces éléments avec discernement, émergent les possibilités de conceptualiser et de perfectionner les enveloppes de divers édifices, en vue de minimiser ultérieurement leur consommation énergétique. Les données présentées ci-dessous offrent un socle de connaissances primordiales, indispensables pour guider les prises de décision tout au long du processus de conception architecturale (Tableau 3.3).

Tableau 3.3 Propriétés du flux thermique des matériaux

Source : (TheGreenAge UK, 2023)

Grandeur	Formule	Définition	Unité
Épaisseur (e)	$e = R \times \lambda$	Épaisseur des matériaux constituant l'enveloppe isolante. Plus elle est grande, plus la résistance thermique est élevée à conductivité thermique égale.	m
Conductivité thermique (Lambda λ)	$\lambda = e / R$	Mesure la facilité avec laquelle la chaleur traverse un matériau. Plus elle est faible, meilleure est la performance thermique.	W/mK
Résistance thermique (valeur R)	$R = e / \lambda$ $= 1 / U$	Mesure la résistance au flux de chaleur à travers une épaisseur donnée d'un matériau. Plus elle est élevée, meilleure est l'isolation thermique.	m ² .K/W
Coefficient de transfert thermique (U)	$U = 1 / R$	Mesure la quantité de chaleur perdue à travers une épaisseur donnée d'un matériau. Plus il est faible, meilleure est l'isolation thermique.	W/m ² K

Remarque : Dans les bâtiments, la résistance thermique totale d'un mur est calculée en additionnant la résistance thermique de chaque couche séparée.

Les matériaux isolants et conducteurs thermiques sont définis par des grandeurs telles que la résistance thermique, la conductivité thermique et le coefficient de transfert thermique pour une épaisseur donnée (Tableau 3.4).

Tableau 3.4 Exemples de matériaux avec leurs propriétés thermiques

Source : (Ministère de l'Habitat, 2016)

Matériaux	Épaisseur (m)	Conductivité thermique (W/mK)	Résistance thermique (m ² .K/W)	Coefficient de transfert thermique (W/m ² K)
Laine de verre	0,1	0,04	2,5	0,4
Laine de roche	0,1	0,04	2,5	0,4
Polystyrène EXP	0,05	0,03	1,7	0,6
Polyuréthane	0,03	0,02	1,5	0,7

1.5.4. Ponts thermiques

Les ponts thermiques au sein des bâtiments constituent des zones de moindre résistance au sein de l'enveloppe, favorisant le transfert amplifié de chaleur ou de froid vers l'intérieur ou l'extérieur (Mayer et al., 2021). Cette situation peut engendrer une augmentation substantielle de la consommation énergétique et peut également engendrer la formation de moisissures. Les ponts thermiques peuvent être observés à divers endroits au sein d'un édifice et sont fréquemment localisés aux points de transition entre différentes composantes architecturales (tels que façade-plancher, façade-toiture, encadrement de fenêtre-façade, etc.). Il est impératif d'identifier et de réduire ces ponts thermiques. Plusieurs approches sont disponibles, dont l'utilisation de techniques telles que la thermographie infrarouge. Cette dernière implique l'acquisition d'images thermiques au moyen d'une caméra infrarouge, permettant d'évaluer la qualité thermique de l'enveloppe du bâtiment (Alhawari & Mukhopadhyaya, 2018).

1.5.5. Charges thermiques externes : Rayonnement solaire

Le rayonnement solaire dans le contexte de l'architecture fait référence à l'énergie émise par le soleil, qui peut être exploitée dans la conception et la construction des édifices (Widén & Munkhammar, 2019). Cet aspect revêt une importance significative lors de la réalisation de bâtiments à consommation nette d'énergie. L'amplitude de cette ressource énergétique varie en fonction du temps et du lieu, et elle peut induire la transmission de chaleur à travers l'ensemble des constituants de l'enveloppe d'un bâtiment. Cependant, l'impact le plus prépondérant du rayonnement solaire est généralement attribué au transfert de chaleur radiante par le biais des surfaces vitrées et des ouvertures, conduisant à un

apport calorifique à l'intérieur du bâtiment, indépendamment de la disparité de température entre l'intérieur et l'extérieur.

1.5.6. Charges thermiques internes

Les charges thermiques internes au sein d'un bâtiment se réfèrent aux sources de chaleur générées à l'intérieur du bâtiment lui-même, qui agissent comme sources et dissipateurs de chaleur. Ces charges thermiques sont influencées par diverses sources (Tableau 3.5) (Díaz et al., 2022). Ces sources exercent une influence directe sur la balance énergétique ainsi que sur le confort thermique de l'environnement bâti. La computation et la paramétrisation des charges thermiques internes se révèlent cruciales dans la modélisation énergétique du bâtiment. Malgré la complexité de cette tâche, plusieurs approches sont utilisées, parmi lesquelles l'exploitation des relevés de factures énergétiques. La compréhension et la quantification de ces charges s'avèrent essentielles pour optimiser et améliorer l'efficacité énergétique des édifices, en vue d'atteindre ultérieurement l'objectif de consommation nette d'énergie.

Tableau 3.5 Les différents type de source de gain de chaleur

Source : (Díaz et al., 2022).

Source de gain de chaleur	Description
Occupants Q_{os}	Le nombre et les activités des occupants ajoutent de la chaleur sensible et latente à l'intérieur
Éclairage Q_i	La densité de puissance d'éclairage est directement liée au gain de chaleur interne. L'utilisation d'appareils d'éclairage plus efficaces et des stratégies de contrôle peuvent réduire le gain de chaleur
Équipements Q_e	Les équipements installés dans un bâtiment génèrent également du gain de chaleur interne

Le gain de chaleur interne sensible total (Q_i) pour les personnes, l'éclairage, l'équipement et les appareils est la somme :

$$Q_i = Q_{os} + Q_i + Q_e \quad (3.1)$$

Où

Q_{os} Gain de chaleur des occupants

Q_i Gain de chaleur du a l'éclairage

Q_e Gain de chaleur des équipements

Il peut être utile de comparer l'impact relatif des différentes sources de gain et de perte de chaleur dans un bâtiment (Hootman, 2013).

1.6. Unités d'énergie et facteurs de conversion

1.6.1. Unités d'énergie et de puissance

L'unité fondamentale de l'énergie dans le Système International (SI) est le joule (J). Il est crucial de différencier l'énergie de la puissance. La puissance désigne la quantité d'énergie par unité de temps (Giunta, 2019), et s'exprime en joules par seconde (J/s) ou en watts (W). La quantité d'énergie est également équivalente à la puissance multipliée par la durée temporelle, formulée selon :

$$\text{Energie} = \text{Puissance} \times \text{Temps} \quad (J = W.s) \quad (3.2)$$

L'unité kilowattheure (kWh) se présente comme la plus couramment employée pour mesurer l'énergie électrique. Un kWh équivaut à un kilowatt (kW), soit 1000 watts de puissance, pendant une heure ou 3600 secondes (Tableau 3.6). Par conséquent :

$$1 \text{ kWh} = 1000 \text{ W} \times 3600 \text{ s} = 3.600.000 \text{ W.s} = 3,6 \text{ MJ.}$$

Tableau 3.6 Les unités SI et non SI pour l'énergie et la puissance

Source : (planete-energies.com, 2022)

Unités d'énergie		Unités de puissance	
SI Unités :	En Joule	SI Unités :	En Watt
J joules	1 J	W watt	1 J/s
KJ kilojoule	10 ³ J	KW kilowatt	10 ³ W
MJ mégajoule	10 ⁶ J	MW mégawatt	10 ⁶ W
GJ gigajoule	10 ⁹ J	GW gigawatt	10 ⁹ W
TJ térajoule	10 ¹² J	TW térawatt	10 ¹² W
PJ pétajoule	10 ¹⁵ J	PW pétawatt	10 ¹⁵ W
EJ exajoule	10 ¹⁸ J	EW exawatt	10 ¹⁸
Unité non Si :		Unité non Si :	
KWh kilowatt heure	3.6x10 ⁶ J	HP chevaux	745.7 W
MWh mégawatt heure	3.6x10 ⁹ J		
Cal calorie	4.2x10 ⁰ J		
Kcal kilocalorie	4.2x10 ³ J		
BTU Unité thermique britannique	1.055x10 ³ J		

La génération d'électricité, notamment au moyen de ressources telles que le gaz naturel, le charbon ou le pétrole (collectivement désignées sous l'appellation d'énergies fossiles ou de combustibles fossiles), a lieu au sein d'une centrale électrique dont le rendement demeure

relativement modeste, s'établissant entre 30 et 60 % de l'énergie initialement contenue (Tableau 3.7).

Tableau 3.7 Rendement de production d'électricité à travers d'autres énergies

Source : (IEA, 2008)

Source d'énergie renouvelable	
Turbine à eau	Jusqu'à 90%
Turbine éolienne	Jusqu'à 59%
Panneaux solaire	6–40% (Panneaux PV modernes autour de 18%)
Efficacité de la transformation électrique	
Gaz naturel	40%
Pétrole	37%
Charbon	34%

De plus, des pertes sont inévitablement encourues lors du transport de l'électricité depuis la centrale jusqu'à l'utilisateur final. En somme, l'efficacité du processus de génération électrique oscille entre 30 et 50 %, cela dépendant des technologies employées. À titre d'exemple, si le rendement moyen s'élève à environ 40 %, la production d'1 kWh d'électricité requiert approximativement 2,5 kWh, ou 9 MJ, d'énergie primaire.

2. Contexte énergétique en Algérie

2.1. Production d'énergie

En 2021, le paysage de la production commerciale d'énergie primaire en Algérie, totalisant 164 millions de tonnes équivalent pétrole (Mtep), se caractérise significativement par la prévalence marquée du gaz naturel (60,4 %) et du pétrole brut (26,6 %). Cette configuration éclaire la suprématie indéniable des hydrocarbures au sein du panorama énergétique algérien. Cela se manifeste non seulement dans la sphère

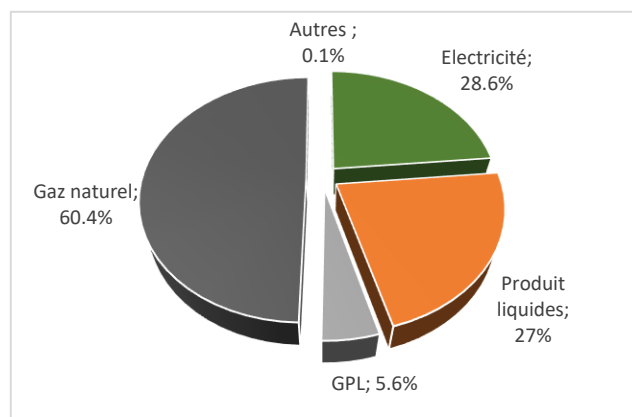


Figure 3.3 Structure de la production commerciale d'énergie primaire

Source : (Énergie et Mines, 2022).

de la production énergétique, mais également dans le contexte des échanges énergétiques internationaux, où le gaz et le pétrole contribuent respectivement à 56 % et 29 % du volume exporté. Néanmoins, cette distribution (Figure 3.3), souligne impérieusement la nécessité

d'intensifier les efforts en vue de diversifier les sources énergétiques et de favoriser l'essor conséquent de l'utilisation des énergies renouvelables (Énergie et Mines, 2022).

La production d'énergie primaire en Algérie a enregistré une croissance substantielle de 13,9 % par rapport à l'année précédente, atteignant un total de 164,4 millions de tonnes équivalent pétrole (Mtep), essentiellement attribuable à l'accroissement de la production de gaz naturel. En dépit de cette augmentation, il convient de noter qu'une diminution de 4,1 % a été observée dans la production d'électricité à partir de sources

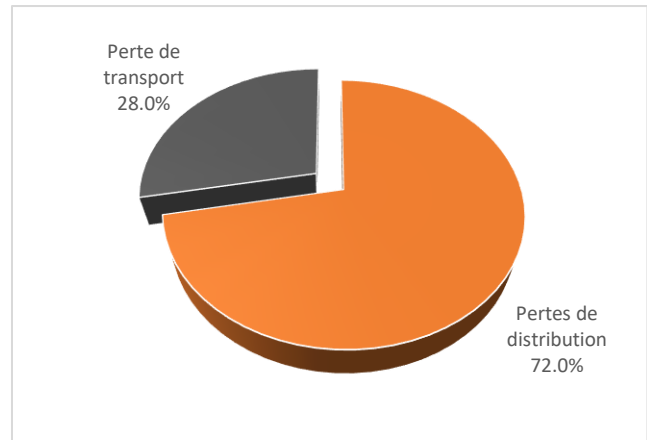


Figure 3.4 Structure des pertes d'énergie

Source : (Énergie et Mines, 2022).

renouvelables par rapport à l'exercice antérieur (Énergie et Mines, 2022). Cependant, malgré l'évolution des technologies de production d'énergie, il est patent que les pertes survenues lors des phases de distribution (72 %) et de transport (28 %) demeurent une problématique notable (Figure 3.4). Ces taux de pertes s'élèvent à 55 % pour l'électricité et à 36 % pour les produits gazeux, ce qui incite à améliorer les méthodes de transport et/ou à promouvoir la génération d'énergie sur site (Énergie et Mines, 2022).

2.2. Réserves

2.2.1. Pétrole

L'analyse des diverses données statistiques concernant les réserves pétrolières algériennes (Tableau 3.8), met en évidence une augmentation des réserves à la fin de l'année 2010, passant de 11,3 milliards à 12,2 milliards de barils. Toutefois, ces réserves ont ensuite maintenu une stabilité pour les années ultérieures, suggérant que malgré la robuste production pétrolière que l'Algérie a connue, cela a été contrebalancé par de multiples découvertes de champs pétrolifères, concourant ainsi à l'équilibre global.

De plus, il est notable que l'Algérie détient approximativement 0,7 % des réserves mondiales, avec un ratio de réserve-production (R/P) évalué à 25,0. Cette mesure signifie que le pays pourrait conserver le même rythme de production durant une période de 25 ans. Néanmoins, cette observation souligne également l'impératif pour l'Algérie d'explorer et de mettre en œuvre des pratiques plus durables en vue de soutenir son équilibre futur et de répondre aux préoccupations environnementales.

Tableau 3.8 Total des réserves prouvées de pétrole

Source : (BP, 2021)

	Fin 2000	Fin 2010	Fin 2019	Fin 2020	Fin 2020		
	Milliards de barils				Milliards de tonnes	Part du total (%)	R/P ratio
Algérie	11.3	12.2	12.2	12.2	1.5	0.7	25.0
Total Afrique	92.9	124.9	125.0	125.1	16.6	7.2	49.8
Total Monde	1300.9	1636.9	1734.8	1732.4	244.4	100	53.5

2.2.1. Gaz naturel

L'étude des différentes données statistiques relatives aux réserves prouvées de gaz naturel en Algérie (Tableau 3.9), révèle que le pays disposait de 4,4 billions de mètres cubes à la clôture de l'année 2000. Cependant, une notable décroissance de ces réserves est observée, chutant jusqu'à 2,1 billions de mètres cubes à la fin de 2020. Cela représente une part de 1,2 % du total mondial, avec un ratio de réserve-production de 28,0. Ce dernier indicateur signifie que, à la cadence de production actuelle, les réserves algériennes pourraient subsister encore pendant 28 ans, une durée quasi équivalente à la moitié de la valeur totale de R/P constatée à l'échelle de l'Afrique et du globe. Il est par ailleurs à noter que les réserves mondiales et africaines ont connu une croissance au cours des dernières années, enregistrant respectivement une augmentation de 1 billion de mètres cubes pour l'Afrique et de 50,1 billions de mètres cubes à l'échelle mondiale. Ces données indiquent clairement la nécessité pour l'Algérie de considérer des investissements dans de nouveaux projets d'exploitation, tout en explorant des avenues de recherche pour des alternatives aux énergies fossiles, compte tenu du taux actuel du R/P.

Tableau 3.9 Total des réserves prouvées de gaz

Source : (BP, 2021)

	Fin 2000	Fin 2010	Fin 2019	Fin 2020	Fin 2020	Fin 2020
	Trillions de mètres cubes				Part du total (%)	R/P ratio
Algérie	4.4	4.3	4.3	2.3	1.2%	28.0
Total Afrique	11.9	14.0	14.9	12.9	6.9%	55.7
Total Monde	138.0	179.9	190.3	188.1	100.0%	48.8

2.2.2. Consommation d'énergie primaire et finale :

Une observation a été faite quant à l'accroissement de la consommation primaire nationale, passant de 62,3 millions de tonnes équivalent pétrole (Mtep) en 2020 à 67,2 millions de Mtep en 2021, représentant une augmentation de près de 7,7 %. Cette augmentation est principalement attribuable à l'essor de la consommation d'électricité et de gaz naturel, enregistrant des augmentations respectives de 11,5 % et 7,8 %.

En 2021, la consommation finale d'énergie nationale, qui a culminé à 50,2 millions de Mtep, se répartit en quatre catégories principales (Figure 3.5) : l'électricité à 29 %, le gaz naturel à 38 %, les produits liquides à 27 % et les autres formes de consommation à 6 %. Cette consommation a enregistré une hausse de 8 % par rapport à l'année précédente, après avoir connu une régression en 2020, reprenant ainsi son niveau d'après la période de pandémie. Toutefois, il est important de noter que cette consommation ne représente que

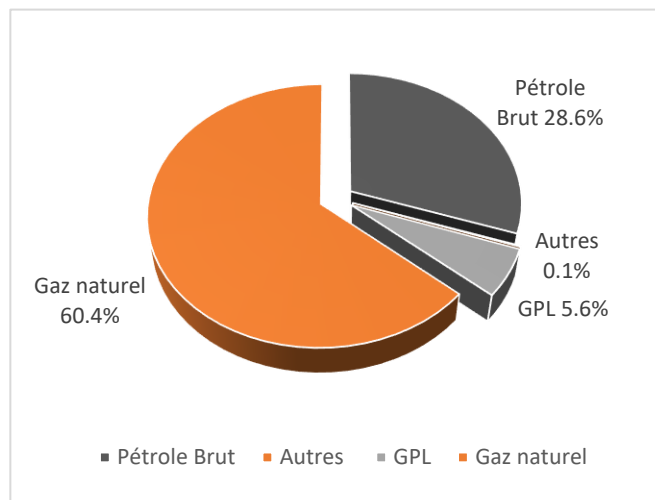


Figure 3.5 Structure de la consommation nationale par forme d'énergie

Source : (Énergie et Mines, 2022).

75 % du total, une proportion substantielle (6 %) étant attribuable aux pertes inhérentes au transport et à la distribution, équivalant à près de 4 Mtep d'énergie. Une tendance à la hausse a été observée dans toutes les catégories énergétiques, avec une expansion particulièrement marquée dans les segments de l'électricité et du gaz naturel (Énergie et Mines, 2022).

2.2.3. Consommation finale d'énergie du secteur résidentiel

En ce qui concerne le secteur résidentiel, il convient de noter qu'une croissance a également été enregistrée dans la consommation d'énergie finale en Algérie, passant de 17,3 millions de tonnes équivalent pétrole (Mtep) à 18 millions de Mtep. Cette évolution se traduit par une augmentation de 4,4 % par rapport à l'année précédente. Il est à souligner que ce secteur détient une part prépondérante, représentant à lui seul 36 % de la consommation énergétique totale de l'Algérie.

Dans l'ensemble, le secteur désigné sous l'intitulé "Ménages et autres", auquel appartient le secteur résidentiel, exerce une prééminence en termes de consommation énergétique algérienne, en capturant 47 % de la somme totale, équivalant à 23,5 millions de Mtep. Il est suivi par le secteur des transports, qui représente 29 % de la consommation, et enfin par le secteur de l'industrie et de la construction, qui compte pour 24 %. L'augmentation notable des niveaux de consommation dans ce secteur revêt une signification significative lors de la formulation des plans et des politiques de transition et d'efficacité énergétique en Algérie (Énergie et Mines, 2022).

2.2.4. L'évolution des coûts énergétiques résidentiels de 1994 à 2023

Au fil du temps, conformément à la pratique adoptée par de nombreux pays, l'Algérie a mis en œuvre divers plans et politiques de tarification de l'énergie. Cependant, ces politiques ont systématiquement été associées à des subventions substantielles. Ce processus de tarification a connu deux phases majeures : la première s'étalant de 1995 à 2005, avec un tarif de 0,935 DZD par kWh pour la première tranche, établie à 1125 kWh, et de 1,609 DZD par kWh pour la deuxième tranche. En 2006, une augmentation significative a été observée, portant le tarif à 1,779 DZD/kWh pour la première tranche et à 4,179 DZD/kWh pour la deuxième. Parallèlement, le tarif du gaz, a lui aussi, connu une augmentation, passant de 0,149 DZD/unité en 1995 à 0,168 DZD/unité en 2005. En outre, au cours de cette même période, la consommation énergétique d'électricité et de gaz a été soumise à une imposition, fixée à 25 DZD pour une consommation comprise entre 71 et 190 kWh, 50 DZD pour une consommation allant de 191 à 390 kWh, et 100 DZD pour une consommation excédant 391 kWh (Zerroug, 2018). Il est pertinent de mettre en évidence que les tarifs de l'électricité et du gaz naturel en Algérie affichent des niveaux notablement inférieurs à ceux observés dans d'autres juridictions. Plus précisément, ils se situent à un écart de 14 fois par rapport aux tarifs des États-Unis, et à un écart de 25 fois par rapport à ceux de l'Union européenne (Makhloufi & Louafi, 2022).

3. Energies renouvelables

3.1. Potentiel des énergies renouvelables

3.1.1. Potentiel solaire

L'Algérie, essentiellement composée de régions sahariennes, bénéficie d'un taux d'irradiance solaire parmi les plus élevés au monde (Figure 3.6). De plus, en raison de sa position géographique, le pays jouit d'environ 2000 heures d'ensoleillement annuel (UNCEA, 2012).

Le Sahara, couvrant la plus vaste étendue territoriale et affichant la plus longue durée moyenne d'ensoleillement, présente une capacité énergétique moyenne de 2650 kWh/m²/an, suivie par la région des hauts plateaux avec 1900 kWh/m²/an, et enfin la région côtière avec 1700 kWh/m²/an. En somme, l'Algérie détient donc une moyenne de 5,7 kWh/m²/jour sur l'intégralité de son territoire, offrant ainsi un potentiel énergétique considérable équivalent à

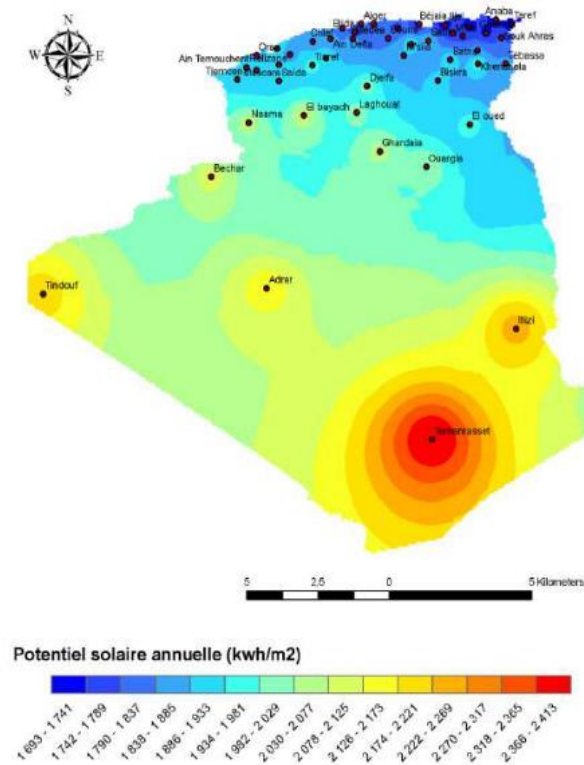


Figure 3.6 Carte d'irradiations solaires en kWh/m²/an

Source : (Gouareh, 2017).

huit fois les réserves nationales annuelles de gaz naturel. Ces données et cette ampleur du potentiel mettent en exergue l'impératif pour l'Algérie d'accroître substantiellement ses investissements dans le domaine des énergies renouvelables. Cela non seulement pour réduire sa dépendance vis-à-vis des énergies fossiles, mais également pour capitaliser sur

l'avantage stratégique qu'une telle démarche peut conférer sur le plan international (UNCEA, 2012).

3.1.2. Potentiel éolien

L'Algérie, caractérisée par une topographie et un climat diversifié, dévoile un potentiel éolien considérable à travers l'étendue de son territoire. Celui-ci se subdivise en deux régions géographiques majeures : le Nord et le Sud. La zone septentrionale se distingue par une côte méditerranéenne étendue sur 1200 km, des reliefs montagneux constitués des chaînes du Tell Atlas et de l'Atlas saharien, ainsi que des plaines et des hauts plateaux continentaux. À l'opposé, le Sud arbore un climat saharien, se caractérisant par des vitesses de vent généralement plus élevées par rapport au Nord (Figure 3.7) (GHEDAMSI, 2018).

Le potentiel éolien en Algérie, tout en étant modéré comparativement à son potentiel solaire, est caractérisé par des vitesses de vent variant de 2 à 6 m/s (UNCEA, 2012), Cette particularité le rend approprié pour des applications telles que le pompage d'eau dans les hauts plateaux, mais moins propice pour des projets commerciaux à grande échelle. L'analyse de la carte permet de constater que des localités telles qu'Adrar, Timimoune, Tindouf et In Salah se distinguent comme les sites les plus adaptés à l'implémentation de

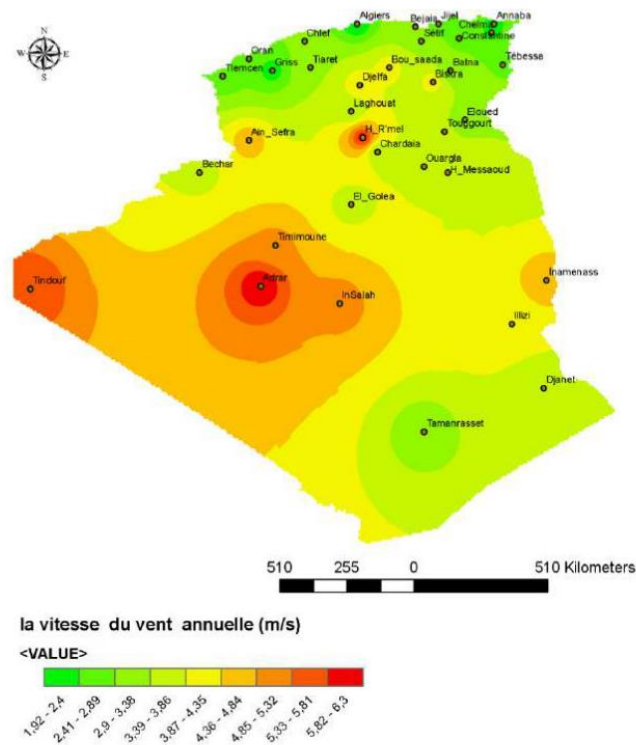


Figure 3.7 Carte de la vitesse du vent en m/s

Source : (Gouareh, 2017)

l'énergie éolienne. Ces sites se caractérisent par des faibles longueurs de rugosité, se situant entre 0,01 et 0,04 mètre, ce qui indique une surface plus lisse propice à des vitesses de vent accrues. Parmi eux, Timimoune ressort comme l'emplacement optimal avec une longueur de rugosité de 0,01 mètre et la vitesse de vent la plus élevée, atteignant 5,1 mètres par seconde. Par ailleurs, plusieurs sites le long de la côte affichent des vitesses moyennes de vent supérieures à 5 m/s, avec des pointes dépassant 8,5 m/s à 80 mètres d'altitude.

3.1.3. Potentiel en géothermie

En raison de son vaste territoire, l'Algérie présente une pléthore de sources géothermiques, tant au nord qu'au sud, affichant un potentiel pouvant atteindre près de 700 MW d'électricité. Ce potentiel est principalement exploité à des fins de bains thermaux et de chauffage des infrastructures publiques utilisant la géothermie. Au cours du dernier recensement, l'Algérie répertoriait environ 200 sources chaudes, principalement situées dans la partie septentrionale du pays, caractérisées par des températures de surface excédant 45 °C et un débit de 2 m³/s à la sortie des réservoirs. L'exemple emblématique « d'Hammam el Meskoutine » illustre ces caractéristiques, avec une température de 98 °C.

Dans le Sud également, plusieurs réservoirs géothermiques sont identifiés à des profondeurs allant de 1000 à 2700 mètres, présentant des températures de surface moyennes

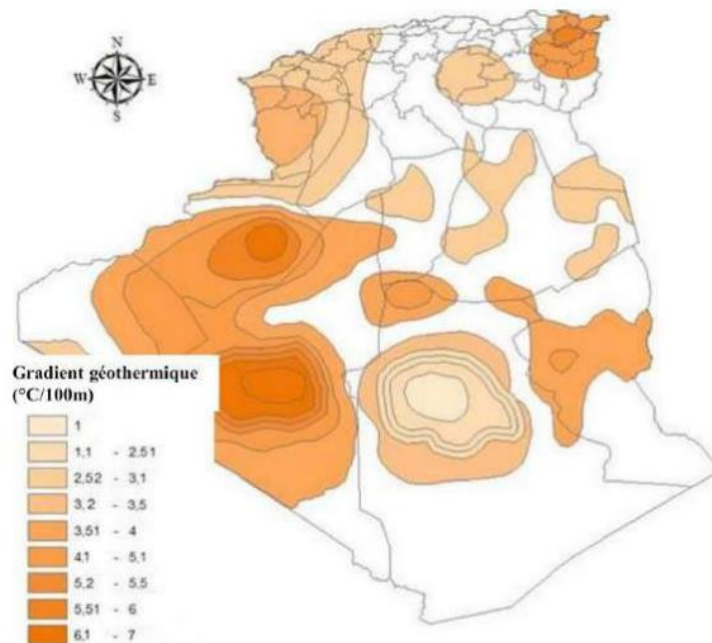


Figure 3.8 Carte des ressources géothermiques

Source : (Gouareh, 2017)

de 57 °C, avec certaines sources affichant jusqu'à 118 °C à Biskra (Figure 3.8) (UNCEA, 2012) (Énergie et Mines, 2022) (Gouareh, 2017).

En conclusion, malgré l'importance des gisements et du potentiel géothermique en Algérie, ceux-ci sont actuellement largement dédiés au chauffage des espaces, comme les hammams. Cependant, il est crucial de noter que le potentiel des sources d'énergie renouvelable pourrait être exploité de manière plus exhaustive, contribuant ainsi à la diversification des ressources hydrocarbures vers une économie plus durable, à faibles émissions de carbone.

3.1.4. Potentiel en biomasse

L'Algérie jouit d'un potentiel considérable en matière de biomasse, attribuable en grande partie aux quantités annuelles de déchets disponibles, qu'ils soient d'origine urbaine, totalisant 5 millions de tonnes, ou issus de l'agriculture, s'élevant à 25 millions de têtes de bétail. Théoriquement, cette masse de déchets pourrait générer environ 37 millions de tonnes équivalent pétrole (Mtep). Néanmoins, malgré ce potentiel, l'utilisation de la biomasse demeure quasiment marginale dans le contexte du bilan énergétique actuel de l'Algérie (UNCEA, 2012) (GHEDAMSI, 2018).

Dans son ensemble, il est manifeste que la biomasse possède un potentiel considérable pour alimenter la transition énergétique algérienne vers des sources plus durables. Cependant, cet avancement exige davantage de recherche et d'efforts visant à développer et mettre en œuvre des stratégies en vue d'exploiter ce potentiel de manière optimale.

3.1.5. Potentiel en hydro-électrique

L'Algérie malgré son vaste territoire ne dispose pas d'un très grand potentiel en hydro-électrique et cela est dû à la composition de ce territoire qui est majoritairement désertique, au dernier recensement l'Algérie disposent de 103 sites potentiel de barrage dont 50 sont actuellement en exploitation soit presque la moitié, mais cette exploitation est essentiellement utilisée à l'irrigation et l'eau potable, cela dû à plusieurs facteurs tels que le manque de pluviométrie et la concentration de celle-ci sur une région restreinte, l'évacuation rapide vers la mer et la forte évaporation, ces ressources diminuent également rapidement avec le changement climatique, les estimations indiquent que les ressources utiles sont de l'ordre de 25 milliards de m³ (Énergie et Mines, 2022). La capacité hydraulique de production d'électricité algérienne n'est qu'à 5 % , soit 286 MW (UNCEA, 2012).

Vu la hausse de la demande énergétique et la dépendance de l'Algérie aux combustibles fossiles, des efforts sont faits pour développer le potentiel de l'énergie hydraulique en Algérie, et cela, malgré son faible potentiel (Énergie et Mines, 2022).

4. Parc de logements

Dans la perspective d'optimiser la consommation énergétique en vue d'atteindre la neutralité énergétique nette au sein des résidences en Algérie, une démarche approfondie nécessite d'être entreprise concernant le parc de logements du pays. Les données statistiques les plus récentes, disponibles auprès de l'Office National des Statistiques (ONS), remontent à l'année 2008. Ces statistiques révèlent une variation du parc de logements en fonction des différentes wilayas de résidence.

Dans le cadre de notre étude et à travers les comparaisons effectuées entre les diverses wilayas, il apparaît que la prédominance du parc de logements se concentre au nord du pays, avec une diminution à mesure que l'on se déplace vers le sud. À titre d'illustration, la capitale Alger, située au nord de l'Algérie, représente 9.4 % du parc total de logements, soit un total de 627326 unités. Dans des régions plus au sud, comme Constantine, avec 3 % du parc de logements, et Ghardaïa, plus au sud encore, avec 1.2 % du parc de logements, on observe une décroissance proportionnelle. Les logements majoritaires sont de nature résidentielles et occupés, toutefois, un pourcentage de 14 % de ces logements demeure inoccupé, malgré la crise du logement que l'Algérie traverse. Le taux d'occupation de ces logements s'établissait à 6.4 en 2008, tendant à diminuer progressivement au fil des années pour être estimé autour de 5.1 à l'heure actuelle.

Tableau 3.10 Répartition des logements habités selon le type de construction

Source : (ONS, 2008)

Wilayas	Type de construction						Total
	Immeuble	Maison individuelle	Maison traditionnelle	Autre ordinaire	Const. précaire	ND	
Alger	190652	212439	31034	10742	46097	23780	514744
Constantine	58238	80143	9724	1693	6991	3853	160642
Ghardaïa	990	45048	7469	219	202	786	54714
Total	1015751	3198252	734394	62547	209734	83666	5304344
Pourcentage	19%	60%	14%	1%	4%	2%	100%

La composition du parc de logements en Algérie reflète une prédominance des habitations individuelles, totalisant 75 % du nombre total de logements, qu'ils soient de conception moderne ou traditionnelle. Ces logements individuels sont suivis par les logements collectifs, représentant 19 % du total, tandis que les constructions précaires comptent pour 4 %. Malgré cette suprématie des logements individuels en nombre, il est important de noter que la majorité de la population algérienne réside dans des logements collectifs, où un seul foyer occupe un logement individuel par rapport à plusieurs foyers partageant un bâtiment collectif (Tableau 3.10).

De plus, on observe une diminution significative du nombre de logements collectifs en s'enfonçant vers le sud, notamment dans des villes telles qu'Alger, avec 190 652 immeubles collectifs, Constantine, avec 58 238 immeubles collectifs, et Ghardaïa, avec 990 immeubles collectifs. En dépit du faible pourcentage de constructions précaires (4 %) en comparaison avec les autres types de logements, il convient de souligner que cette situation demeure préoccupante. Une analyse plus approfondie s'avère donc nécessaire pour mieux appréhender et gérer cette problématique.

Tableau 3.11 Structure des logements habités disposant de commodités

Source : (ONS, 2008)

Wilayas	Cuisine	Salle de Bain	Toilettes	Réseau électrique	Gaz naturel	Réseau d'égout	Réseau AEP
Alger	90.4	71.7	90.9	92.8	61.5	86.3	86.8
Constantine	91.1	74.2	95.5	97.9	82.1	92.8	90.5
Ghardaïa	91.3	90.1	95.0	96.5	65.9	86.4	89.4
Total	88.3	65.2	91.4	94.5	45.8	77.5	80.8

L'Office National des Statistiques (ONS) offre également des données statistiques qui fournissent une vue d'ensemble des différentes commodités dont sont pourvus les logements (Tableau 3.11). Ces informations englobent des éléments tels que les cuisines, les salles de bains, les toilettes, ainsi que la connectivité aux réseaux électrique, de gaz naturel, d'égout et d'approvisionnement en eau potable (AEP).

En ce qui concerne les commodités, il apparaît que la grande majorité des logements sont équipés de cuisines et de toilettes, avec un taux de plus de 88 %. Cependant, en ce qui concerne les salles de bains, il est constaté qu'un tiers des logements ne disposent pas de cet aménagement. Par ailleurs, 94.5 % des logements sont raccordés au réseau électrique, tandis

que près de la moitié de ces logements ne sont pas connectés au réseau de gaz naturel. Concernant les réseaux d'égout et d'approvisionnement en eau potable, il est relevé que plus d'un tiers des logements sont connectés à ces réseaux.

Tableau 3.12 Répartition du parc logement selon la wilaya de résidence,

Source : (ONS, 2008)

Wilayas	Habité	Logement secondaire	Inhabité	A usage professionnel	Total	T O L
Alger	514744	36452	63176	12954	627326	5.8
Constantine	160642	10102	27370	1491	199605	5.8
Ghardaïa	54714	9492	15042	331	79579	6.6
Total	5304344	412048	932610	37122	6686124	6.4
Pourcentage	79%	6%	14%	1%	100%	

L'ONS présente également une analyse du taux d'occupation des logements en Algérie, soulignant que la majorité des logements, soit 80 %, étaient occupés avec un taux d'occupation variant de 5.8 à 6.4 en 2008 (Tableau 3.12).

Cependant, cette mesure a progressivement diminué au fil du temps pour atteindre une fourchette allant de 4.5 à 5 par logement de nos jours (GHEDAMSI, 2018).

5. Politique d'efficacité énergétique en Algérie

5.1. Cadre réglementaire et incitatif

La politique d'efficacité énergétique en Algérie est encadrée par la loi n° 99-09 du 28 juillet 1999, qui est spécifiquement axée sur la maîtrise de l'énergie. Cette loi englobe un ensemble de mesures visant à promouvoir la rationalisation de la consommation d'énergie, à réduire l'impact énergétique sur l'environnement et à favoriser le développement des sources d'énergie renouvelable. Cette législation est renforcée par diverses mesures réglementaires qui ciblent le développement de chaque secteur. Ces initiatives se trouvent synthétisées par la suite (Tableau 3.13) :

Tableau 3.13 Politique d'efficacité énergétique en Algérie

Source : (MTEER et al., 2022)

Nom	Type	Année
Réglementation thermique dans les bâtiments neufs (et extensions)	Normes obligatoires - pour les bâtiments - Normes de performance énergétique	2000
Étiquetage énergétique des réfrigérateurs, des congélateurs et des appareils combinés, des climatiseurs et des lampes	Informations obligatoires - Étiquettes - Étiquetage obligatoire des appareils électriques	2009
Taxe d'efficacité énergétique (TEE sur les appareils)	Subvention/Taxation	2016
Diffusion des lampes économiques	Financier - Subventions pour les appareils électriques à haut rendement	2017
Installation de chauffe-eau solaire individuel		2017
Isolation thermique dans les constructions (neuf et rénovation)	Financier – Subvention pour de nouvelles constructions efficaces et réhabilitation.	2019

5.2. Cadre institutionnel

En Algérie, le cadre institutionnel en matière d'énergie vise à orchestrer les efforts des divers acteurs impliqués dans la promotion de l'efficacité énergétique et la réduction de la consommation énergétique à travers l'ensemble des secteurs. Ce dispositif englobe plusieurs institutions, dont les rôles sont, soit directs soit indirects dans la promotion de l'efficacité énergétique. Parmi ces entités figure le Ministère de la Transition Énergétique et des Énergies Renouvelables (MTEER), qui représente le gouvernement algérien, et l'Agence pour la Promotion et la Rationalisation de l'Utilisation de l'Énergie (APRUE), agissant sous sa tutelle. Ces organes ont la responsabilité directe de promouvoir l'efficacité énergétique en Algérie. Parallèlement, d'autres institutions ont également un rôle indirect dans cette promotion, à l'instar des ministères des Finances et des Douanes, du Commerce, de l'Industrie, de l'Habitat et de l'Urbanisme, des Transports et des Travaux publics, de l'Intérieur et des Collectivités locales. L'Institut Algérien de Normalisation (IANOR), en charge des normes, ainsi que le Commissariat aux Énergies Renouvelables et à l'Efficacité Énergétique, de même que les organismes de recherche avec leurs différentes catégories, contribuent à cette dynamique. Le tableau ci-dessous détaille les responsabilités assignées à chacune de ces entités (Tableau 3.14) (MTEER et al., 2022) :

Tableau 3.14 les efforts des différents acteurs qui visent à promouvoir l'efficacité énergétique en Algérie

Source : (MTEER et al., 2022)

Organisme	Charges
Ministère de la Transition Énergétique et des Energies Renouvelables (MTEER)	Charger de développer et de promouvoir un modèle de production et de consommation d'énergie durable basé sur les économies d'énergie et les sources d'énergie renouvelables.
Agence pour la Promotion et la Rationalisation de l'Utilisation de l'Énergie (APRUE)	Agence chargée de la mise en œuvre des politiques d'efficacité énergétique, placée sous la supervision du MTEER.
Commissariat aux Energies Renouvelables et à l'Efficacité Énergétique (CEREFE)	Évaluer la politique nationale de développement des énergies renouvelables et de l'efficacité énergétique, ainsi que les outils utilisés pour les mettre en œuvre.
Institut Algérien de Normalisation (IANOR)	Il est chargé d'élaborer, de publier et de diffuser les normes algériennes, de coordonner les activités de normalisation et de promouvoir la recherche et les essais nécessaires à l'établissement et à l'application des normes. Il gère également les marques de conformité, les labels de qualité et met en œuvre les conventions et accords internationaux.
Fonds national pour la maîtrise de l'énergie pour les énergies renouvelables et de la cogénération (FNMEERC)	<ul style="list-style-type: none"> • Finance des Projets liés à l'efficacité énergétique. • La promotion de l'efficacité énergétique par la communication et l'éducation, la recherche et le développement, et l'évaluation. • Finance des projets spécifiques, tels que l'isolation thermique des bâtiments, la promotion de l'éclairage et des appareils efficaces, la promotion des chauffe-eau solaires
Organismes de recherche	Adapter et/ou développer des technologies pour le contexte local et fournir un soutien technique et une assistance pour certains aspects liés au développement ou à la mise en œuvre de politiques d'efficacité énergétique. Comme le Centre national d'études et de recherches intégrées du bâtiment (CNERIB)
Les ministères	<ul style="list-style-type: none"> • Ministère du Commerce • Ministère des Finances • Ministère de l'industrie • Ministère de l'habitat et de l'urbanisme • Ministère de l'intérieur, des collectivités locales et de l'aménagement du territoire

5.3. Secteur du bâtiment

5.3.1. Évaluation de la situation actuelle

Le secteur du bâtiment, en tant qu'un des principaux consommateurs d'énergie et émetteurs de gaz à effet de serre en Algérie, représentant plus d'un tiers du total, assume un rôle capital dans la transition et la vision nationale visant à améliorer l'efficacité énergétique du pays, réduire sa consommation énergétique et atténuer les émissions de gaz à effet de serre. Cette perspective se concrétise à travers le Programme National de Maîtrise de l'Énergie (PNME) dont l'objectif est de réaliser ces ambitions d'ici à 2030. Toutefois, ce

programme d'efficacité énergétique est confronté à plusieurs défis, parmi lesquels se distinguent les points suivants (MTEER et al., 2022) :

- Des procédures complexes, peu transparentes, voire parfois inexistantes.
- Des ressources humaines et financières insuffisantes.
- Une implication limitée du secteur du logement dans cette transition.
- Le manque d'audits et d'études thermiques et énergétiques dans le secteur du bâtiment.
- Une absence ou une faiblesse du marché potentiel de l'efficacité énergétique.
- Le manque d'incitations financières et d'informations accessibles au grand public.

5.3.2. Méthodologie à suivre Dans le secteur du bâtiment

L'Agence Internationale de l'Énergie (AIE) a élaboré une démarche méthodologique structurée pour réaliser les divers programmes d'efficacité énergétique. Cette méthodologie est articulée en plusieurs étapes, subdivisées en quatre phases principales (Tableau 3.15) :

Tableau 3.15 IEA Policy Pathway "Programmes d'efficacité énergétique"

Source : (MTEER et al., 2022), (EIA, 2016)

Phases	Étapes
Planification	Adapter chaque programme pour répondre aux besoins et aux circonstances spécifiques d'un sous-secteur
Mise en œuvre	Promouvoir le programme, engager les parties prenantes et gérer le programme
Suivi	Collecter, examiner et diffuser les données.
Evaluation	Déterminer les résultats, les impacts et les facteurs de réussite du programme, évaluer le rapport coût-efficacité et l'efficacité des instruments utilisés

Les quatre phases du Policy Pathway préconisées par l'AIE présentent des similitudes avec l'approche cyclique 'Plan-Do-Check-Act' (de Deming et Shewhart) prévue par la norme ISO 50001 pour les entreprises. Elles sont toutes orientées vers l'amélioration des performances.

5.3.3. Les mesures indispensables pour promouvoir l'efficacité énergétique.

L'impératif d'adopter un ensemble exhaustif de mesures en faveur de la promotion de l'efficacité énergétique est incontestable, étant donné que la résolution des divers obstacles entravant le marché de l'efficacité énergétique requiert une approche intégrée. Cet ensemble de mesures recommandées comprend les suivantes (MTEER et al., 2022) :

- Les mesures réglementaires, qui visent à établir des normes minimales de performance pour les technologies, les constructions et les systèmes énergétiques.
- Les mesures d'information, qui ont pour objectif de sensibiliser les consommateurs et les entreprises à l'importance de l'efficacité énergétique.
- Les mesures de financement, qui cherchent à faciliter l'accès aux ressources financières et aux capitaux nécessaires.
- Les mesures de renforcement des capacités, visant à développer les compétences et les connaissances des parties prenantes en matière d'efficacité énergétique.
- Les mesures d'innovation, qui encouragent la création de nouvelles technologies et approches dans le domaine de l'efficacité énergétique.

Ces diverses mesures, considérées comme des piliers fondamentaux, jouent un rôle essentiel dans l'élaboration d'une politique d'efficacité énergétique cohérente et intégrée. Toutefois, il est essentiel de noter que la mise en œuvre d'un ensemble complet de mesures peut s'avérer relativement complexe. Par conséquent, il est impératif de souligner que l'adoption d'une telle approche exhaustive est de la plus haute importance pour promouvoir de manière efficace l'efficacité énergétique à travers tous les secteurs concernés.

5.3.4. Normes d'efficacité énergétique pour les constructions neuves

La mise en application volontaire de la réglementation thermique relative à l'efficacité énergétique des bâtiments neufs suscite des problématiques liées au non-respect et à la non-application lors de la phase de construction. Afin de pallier ces défis, des ajustements sont préconisés, comprenant les éléments suivants (MTEER et al., 2022) :

- Les impératifs réglementaires : Il convient de revoir la réglementation thermique en vigueur pour une transition vers une approche plus globale.
- La délimitation de méthodologies et de seuils : L'établissement de seuils précis et de méthodes d'évaluation de la performance énergétique des bâtiments neufs revêt une importance cruciale.
- La désignation d'une entité de contrôle et de vérification : Une institution responsable de la surveillance et de la validation doit être établie par voie réglementaire.
- L'instauration de procédures de contrôle normalisées : L'établissement de procédures de contrôle claires, structurées et simplifiées pour la réglementation

thermique est impératif. Ces procédures doivent être codifiées dans des décrets et des arrêtés.

En résumé, l'amélioration de la régulation thermique relative aux bâtiments neufs nécessite la mise en place d'une procédure de contrôle transparente, la désignation d'une entité de contrôle et de validation, la révision de la réglementation vers une approche plus globale et la spécification de seuils et de méthodologies appropriées.

5.3.5. Nouveaux instruments à mettre en place

Dans le contexte de l'élaboration du rapport relatif à l'évolution du cadre réglementaire et incitatif en matière d'efficacité énergétique en Algérie, divers mécanismes ont été suggérés en vue de renforcer l'efficacité énergétique des édifices et des constructions dans le pays (Tableau 3.16).

Tableau 3.16 Instruments à mettre en place

Source : (MTEER et al., 2022),

Sujet	Résumé	Avantages
Classification énergétique des bâtiments	La mise en œuvre d'un certificat de performance énergétique pour les bâtiments peut stimuler la demande du marché pour des bâtiments plus efficaces énergétiquement.	<ul style="list-style-type: none"> • Encourage le marché à s'orienter vers des bâtiments plus efficaces sur le plan énergétique • Renforce la mise en œuvre des réglementations thermiques
Incitations financières et réforme des prix de l'énergie	Les incitations financières, telles que les subventions, peuvent contribuer à promouvoir les investissements dans l'efficacité énergétique. Les réformes des prix de l'énergie peuvent augmenter progressivement les prix de l'énergie et supprimer les subventions, encourageant ainsi l'efficacité énergétique.	<ul style="list-style-type: none"> • Encourage les mesures d'efficacité énergétique dans les bâtiments • Offre des avantages économiques aux propriétaires • Promouvoir l'utilisation de sources d'énergie renouvelables
Campagnes de sensibilisation et d'information	Une sensibilisation accrue, la confiance des consommateurs et la diffusion des résultats des projets pilotes peuvent contribuer à promouvoir l'adoption de mesures d'efficacité énergétique.	<ul style="list-style-type: none"> • Promouvoir et diffuser l'application de mesures d'efficacité énergétique dans la construction • Accroître la confiance des consommateurs dans les opportunités potentielles

6. Energie et environnement

6.1. Les émissions CO₂e de l'Algérie

L'analyse des statistiques liées aux émissions de gaz à effet de serre pour chaque pays est une nécessité et revêt une grande importance dans la compréhension des tendances des

émissions provenant de différentes sources. Cette étude permet également d'évaluer l'efficacité des stratégies mises en œuvre pour atténuer ces émissions.

Dans le cas de l'Algérie, les données indiquent un taux annuel de croissance de 3,2 % entre 2011 et 2021, avec un taux de 6,0 % pour l'année 2021. Comparée au total mondial, l'Algérie ne représente que 0,6 % de ces émissions, tandis que l'ensemble du continent africain contribue à peine à hauteur de 4,4 % de ces émissions. Malgré ces taux d'émission relativement faibles, il est évident que l'Algérie connaît une augmentation constante de ses émissions. Cela soulève la question de possibles lacunes ou d'une mise en œuvre limitée des stratégies visant à réduire ces taux. Il est donc nécessaire de surveiller attentivement ces émissions afin d'atténuer leur impact sur le changement climatique (Tableau 3.17).

Tableau 3.17 Émissions d'équivalent dioxyde de carbone provenant de l'énergie, des émissions de processus, du méthane et du brûlage en millions de tonnes d'équivalent dioxyde de carbone

Source : (BP, 2022)

	Algérie	Total Afrique	Total Monde
2011	178.8	1468.7	36303.0
2012	190.2	1549.8	36747.3
2013	206.7	1562.6	37341.6
2014	219.1	1584.2	37547.0
2015	225.7	1598.1	37516.8
2016	229.0	1629.6	37727.1
2017	232.9	1671.3	38194.6
2018	242.6	1695.4	39104.0
2019	244.2	1742.6	39152.8
2020	231.9	1594.8	36963.7
2021	245.2	1705.1	38976.6
Taux de croissance 2021	6.0%	7.2%	5.7%
Part de 2021	0.6%	4.4%	100%

6.2. Réduction des émissions de CO₂e en Algérie

L'Algérie s'est engagée à réduire ses émissions de CO₂e conformément aux engagements pris lors de la COP21 à Paris en vue de l'année 2030. L'objectif est de graduellement réduire ces émissions d'ici à cette date. Le ministre des Énergies et des Mines a fourni un aperçu de ces réductions comme il suit (Tableau 3.18) :

Tableau 3.18 récapitulatif des émissions de CO₂e à éviter à l'horizon 2030 en millions de tonnes CO₂

Source : (Énergie et Mines, 2022).

	2015	2020	2025	2030
Emissions évitées	1,1	32,1	95,9	193,3

Les programmes gouvernementaux ne se limitent pas seulement à la réduction des émissions de gaz à effet de serre. Ils visent également à réduire la dépendance énergétique envers les combustibles fossiles et à favoriser l'utilisation des énergies renouvelables. Il est important de souligner que ces programmes ambitionnent de réduire plus de 80 % des émissions d'ici à 2030, ce qui correspond à une valeur de 193,3 millions de tonnes de CO₂. Cette démarche, combinée à l'amélioration de l'efficacité énergétique, aura un impact positif sur l'environnement ainsi que sur l'économie, avec des bénéfices estimés à environ 38 milliards de dollars (Énergie et Mines, 2022).

La mise en œuvre des programmes d'efficacité énergétique et d'adoption des énergies renouvelables, proposés par le Ministère des Mines et des Énergies, pourrait donc entraîner une réduction significative des émissions de CO₂.

7. Niveau de connaissance et de sensibilisation des professionnels à la NZE (Questionnaire)

7.1. Le questionnaire

Pour cette étude, un questionnaire a été distribué auprès de professionnels de la conception architecturale dans différentes régions du pays. Le questionnaire se composait de deux parties principales : une section générale et personnelle, suivie d'une section plus spécifique à notre thème, utilisant l'échelle de Likert à cinq niveaux. L'objectif du questionnaire était de recueillir des informations sur le niveau de connaissance et de sensibilisation des professionnels concernant le thème de la NZE, ainsi que sur le changement climatique, l'efficacité énergétique et les énergies renouvelables.

Les résultats et les données collectés ont été soumis à une analyse descriptive afin de fournir une compréhension globale du niveau de connaissance et de sensibilisation des professionnels concernant le sujet. Le questionnaire a été structuré autour de cinq axes clés :

- (1) Information générale et personnel : Huit questions ont été posées pour obtenir des informations sur l'échantillon étudié, incluant l'âge, le sexe, les régions, les types de logements, le statut professionnel et l'éducation.

- (2) Changements climatiques et réchauffement planétaire : Cinq questions se sont concentrées sur le niveau de préoccupation des professionnels concernant le changement climatique et leur compréhension de ses effets.
- (3) Efficacité énergétique et Consommation Énergétique des Bâtiments : Cet axe comprenait neuf questions concernant la familiarité des professionnels avec les concepts d'efficacité énergétique, ainsi que l'état actuel de leur mise en œuvre.
- (4) Énergies renouvelables : Sept questions ont évalué les connaissances et l'intérêt des professionnels pour les sources d'énergie renouvelable.
- (5) La net zéro énergie : Cet axe comportait vingt questions liées au niveau de compréhension des professionnels du concept de Net Zéro Énergie, de leur responsabilité perçue et des changements suggérés pour son intégration

Étant donné que la première phase de la réalisation de la net zéro énergie concerne la conception, ce questionnaire a ciblé une population d'architectes chargés de la conception de projets de logements collectifs. Plus précisément, il s'agissait des architectes officiellement reconnus et agréés par l'État, travaillant au sein de différents bureaux d'études techniques (BET) à travers le pays. Selon les statistiques fournies par Abdelhamid Boudaoud, Président du Collège National Des Experts Architectes, le 27 juin 2021, pour la revue Algérie Éco, le nombre d'architectes agréés s'élève à 12 000, ce qui équivaut à environ deux architectes pour 100 000 habitants.

La taille de la population et de l'échantillon pour cette étude a été déterminée à l'aide de l'équation suivante (Makvandia & Safiuddin, 2021) :

$$n = \frac{Nz^2p(1-p)}{e^2(N-1) + z^2p(1-p)} \quad (3.3)$$

Avec :

n Taille de l'échantillon requise

N Taille de la population (population active)

p Proportion attendue de la population (prévalence)

z Paramètre statistique (score z) pour un niveau de confiance (CL)

e Marge d'erreur (niveau de précision)

Dans le cadre de notre étude, nous avons opté pour une marge d'erreur de 10 %, associée à un niveau de confiance de 90 %. Pour le calcul de la taille de l'échantillon, nous avons

utilisé une valeur estimée p de 0.5, correspondant à un équilibre entre la présence et l'absence de connaissance et de sensibilisation aux concepts de la net zéro énergie parmi les architectes. Le score Z de 1.65 a été sélectionné en fonction du niveau de confiance choisi.

En appliquant ces paramètres à l'équation de calcul de la taille d'échantillon précédemment exposée, nous avons déterminé que la taille d'échantillon requise était de 116 personnes. Cette taille d'échantillon était destinée à capturer un échantillon représentatif des perspectives des architectes participant à l'étude, tout en fournissant une marge d'erreur acceptable compte tenu des contraintes pratiques.

7.2. Information générale :

Dans le cadre de ce questionnaire, une série de questions à caractère général et personnel a été posée afin d'obtenir une vue d'ensemble de l'échantillon étudié. Ces questions ont été conçues pour fournir une base permettant une analyse plus approfondie des facteurs qui pourraient influencer le niveau de sensibilisation et de connaissance des professionnels concernant la net zéro énergie. Les variables considérées incluent l'âge, le sexe, la région de résidence, le niveau de qualification et le type de bâtiments habités par les participants. Les résultats obtenus fournissent des informations précieuses sur les caractéristiques démographiques de l'échantillon étudié.

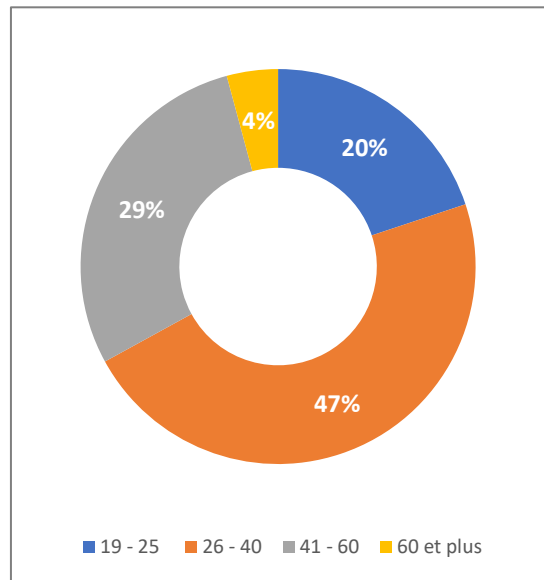


Figure 3.9 Tranche d'âge de l'échantillon étudié.

Source : (Auteur, 2022)

Ces informations démographiques servent de contexte pour mieux comprendre les résultats de l'analyse ultérieure et peuvent contribuer à identifier d'éventuelles tendances ou corrélations entre les caractéristiques personnelles des participants et leur niveau de connaissance et de sensibilisation aux concepts de la net zéro énergie. En examinant ces données, il est possible de cerner des influences potentielles qui pourraient jouer un rôle dans la manière dont les professionnels perçoivent et appréhendent les enjeux liés à la durabilité énergétique et à l'efficacité énergétique dans le secteur de la construction.

La répartition selon les tranches d'âge peut potentiellement influencer le niveau de sensibilisation et de connaissance des participants, et une question a été posée à ce sujet. Les répondants ont été répartis en quatre groupes d'âge, allant de 19 ans à plus de 65 ans. On

peut constater que la tranche d'âge la plus représentée est celle de 26 à 40 ans, suivie de celle de 41 à 60 ans, qui représente 30.2 % des réponses. Les tranches d'âge de 19 à 25 ans et de plus de 65 ans représentent respectivement 15.9 % et 4.4 % des réponses. Ces informations sont précieuses pour adapter les méthodes de sensibilisation en fonction des différentes tranches d'âge (Figure 3.9).

Le genre peut également jouer un rôle dans l'influence du niveau de connaissance. Les données du questionnaire montrent que la majorité des répondants sont de sexe masculin (68 %). Cela suggère qu'il pourrait y avoir des différences en termes de niveau de connaissance et d'intérêt pour les questions environnementales en fonction du genre. Des études antérieures ont déjà suggéré que le genre peut avoir une incidence sur la sensibilisation environnementale, les femmes montrant souvent une plus grande préoccupation et une plus grande sensibilité à l'environnement. La région de résidence peut aussi jouer un rôle. La majorité des répondants se situent dans la région des hauts plateaux, suivie de la région côtière, puis

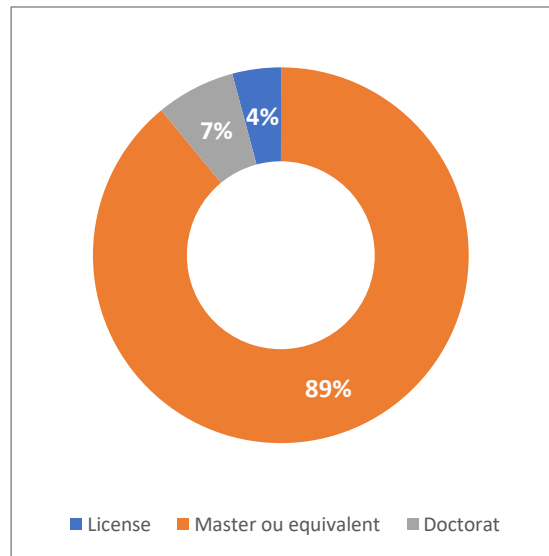


Figure 3.10 Niveau d'éducation de l'échantillon étudié.

Source : (Auteur, 2022)

de la région saharienne. Ces données pourraient suggérer que la région avec la plus forte concentration d'architectes pratiquants pourrait par ailleurs abriter un plus grand nombre de professionnels ayant des connaissances en développement durable. Cependant, une recherche plus approfondie avec un échantillon plus important pourrait être nécessaire pour confirmer cette tendance. Le niveau d'éducation joue également un rôle important dans ce type de questionnaire. La majorité des répondants possèdent un master ou un diplôme équivalent, ce qui suggère qu'ils aient reçu une éducation avancée en conception et en construction architecturale. Cette éducation peut inclure des éléments de développement durable dans la construction, ce qui pourrait avoir un impact positif sur leurs connaissances en matière de net zéro énergie dans le domaine de la construction.

7.3. Changements climatiques et réchauffement planétaire

Le changement climatique et le réchauffement planétaire sont devenus des problèmes d'une importance capitale dans notre ère actuelle. Les scientifiques ne cessent d'alerter sur les catastrophes potentielles que de tels changements pourraient engendrer, notamment l'élévation du niveau des mers, l'augmentation de la fréquence des catastrophes naturelles, la perturbation de la sécurité alimentaire et la diminution des ressources en eau potable.

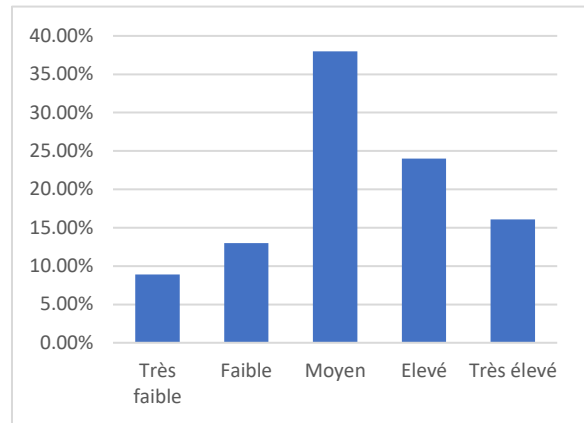


Figure 3.11 Niveau de préoccupation au changement climatique actuels

Source : (Auteur, 2022)

Face à ces enjeux, il est crucial que les individus, les organismes et les gouvernements comprennent la gravité de la situation. C'est dans ce contexte que les questions de cet axe ont été élaborées, afin de cerner le degré de préoccupation des professionnels vis-à-vis du changement climatique, tant au niveau mondial qu'au niveau algérien.

Parmi l'ensemble des répondants, 38 % ont exprimé un niveau moyen de préoccupation par rapport au changement climatique actuel. En outre, 22 % des participants ont déclaré avoir un niveau faible, voire très faible de préoccupation à l'égard de cette problématique. Cette divergence de préoccupations est importante, surtout compte tenu du rôle essentiel que jouent les architectes dans la mission de réduction des émissions et de promotion d'une approche plus durable (Figure 3.11).

En ce qui concerne l'impact du changement climatique sur le monde et sur l'Algérie, il ressort que 92 % des répondants considèrent que le changement climatique affecte le monde en général, tandis que 77 % estiment qu'il a un impact sur l'Algérie. Ces résultats montrent qu'une minorité pense que les autres pays sont davantage touchés que l'Algérie.

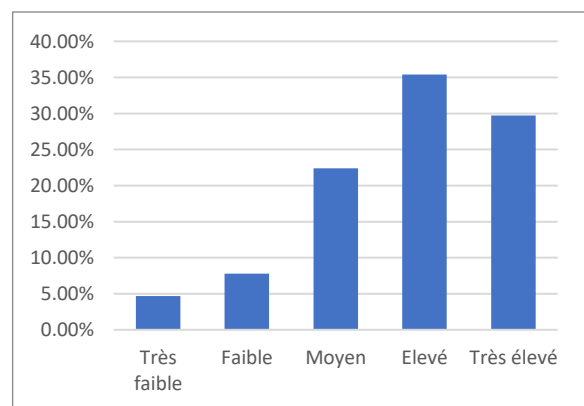


Figure 3.12 L'effet du secteur du bâtiment sur le changement climatique

Source : (Auteur, 2022)

Quant à l'impact du changement climatique sur les générations futures, la majorité des professionnels pensent que celui-ci aura des conséquences significatives sur le

futur de la planète. Cette question est cruciale, car les actions entreprises aujourd'hui décideront du sort des générations futures.

Enfin, la dernière question de cet axe portait sur le rôle du secteur du bâtiment dans la contribution au changement climatique. Bien que 65 % des professionnels jugent que ce secteur à un impact majeur sur la planète, 13 % des répondants ont indiqué un faible, voire très faible impact. Cette variabilité d'opinions souligne l'importance d'accroître la sensibilisation et la connaissance au sein de cette profession afin d'adopter des pratiques plus durables (Figure 3.12).

7.4. Efficacité énergétique et consommation énergétique des bâtiments

Le troisième axe de l'étude se concentre sur l'efficacité énergétique et la consommation énergétique des bâtiments. Étant donné que le secteur du bâtiment contribue à hauteur d'un tiers de la consommation énergétique et des émissions de gaz à effet de serre à la fois dans le monde et en Algérie, les professionnels ont été interrogés sur leur niveau de connaissance en matière d'efficacité énergétique.

Les résultats montrent que 76 % des répondants possèdent un niveau de connaissance allant de moyen à très élevé en matière d'efficacité énergétique, tandis que moins de 25 % ont un niveau faible de connaissance. Cependant, en ce qui concerne leurs compétences pour différencier les éléments de base liés à l'énergie, les résultats sont moins satisfaisants, car 34 % des répondants estiment avoir un niveau faible dans cette thématique (Figure 3.13).

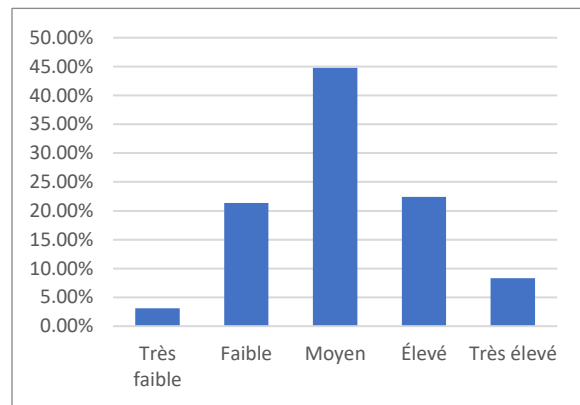


Figure 3.13 Niveau de connaissances en matière d'efficacité énergétique

Source : (Auteur, 2022)

En ce qui concerne la motivation à réduire la consommation énergétique de leurs projets, 89 % des répondants ont exprimé un niveau allant de moyen à très élevé. Parmi les principaux éléments d'incitation à cette démarche, la réduction des coûts économiques et des charges énergétiques apparaît en premier lieu, suivi par les enjeux climatiques et la préservation des ressources naturelles (Figure 3.14).

Les résultats révèlent également que la majorité des professionnels ne surveillent pas la consommation énergétique de leurs bâtiments, ni pendant la phase de conception à l'aide de

logiciels de simulation, ni après la réalisation de leurs projets en utilisant des indicateurs énergétiques.

Enfin, dans les deux dernières questions, 93 % des professionnels ont répondu que l'utilisation de stratégies passives dans la construction, telles que l'emploi d'une meilleure isolation ou une orientation optimale, peut réduire la consommation énergétique des bâtiments. De plus, 89 % de ces répondants estiment que l'adoption de technologies actives telles que les LED peuvent également améliorer l'efficacité énergétique des bâtiments.

Dans l'ensemble, les résultats indiquent que les répondants, qui sont des professionnels de l'architecture, possèdent un niveau moyen de connaissance en ce qui concerne le changement climatique et l'efficacité énergétique. Cependant, ils sont motivés à réduire la consommation énergétique et les émissions de gaz à effet de serre. Néanmoins, cela nécessitera davantage de sensibilisation ainsi que la mise en place de réglementations promouvant l'amélioration de l'efficacité énergétique dans le secteur de la construction et du bâtiment.

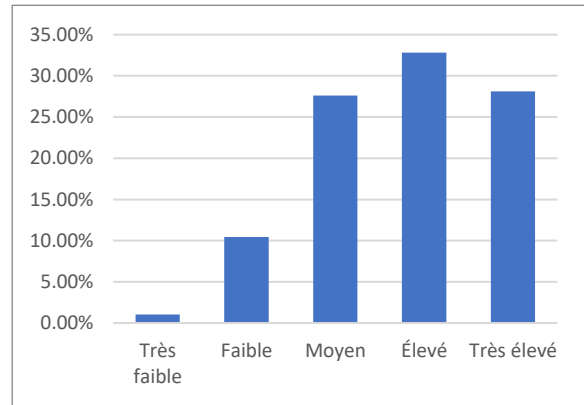


Figure 3.14 Motivation pour réduire la consommation énergétique de leurs projets

Source : (Auteur, 2022)

7.5. Les énergies renouvelables

Les énergies renouvelables, en tant qu'élément clé d'une transition verte dans le secteur du bâtiment, ont fait l'objet d'un axe d'analyse spécifique dans ce questionnaire. Les questions de cet axe visent à évaluer le niveau de connaissance, la perception et les attitudes des professionnels envers cette thématique.

Dans l'évaluation des connaissances des professionnels en matière d'énergies renouvelables, une majorité (85 %) a affirmé posséder un niveau assez bon dans ce domaine (Figure 3.15). Ils considèrent que l'énergie solaire est l'une des ressources majeures dont dispose l'Algérie dans le secteur des énergies renouvelables. Cependant, les avis sont plus nuancés concernant l'adéquation de l'énergie solaire à tous les climats algériens. Malgré cela, plus de 52 % des professionnels estiment que l'utilisation de l'énergie solaire est possible dans tous les climats du pays. Par la suite, une majorité des professionnels ont exprimé leur intérêt pour l'utilisation et l'installation des énergies renouvelables dans leurs futurs projets, avec un taux favorable de 94 %. Ils souhaitent également obtenir davantage d'informations sur les méthodes de fonctionnement de ces technologies à court terme. De plus, cette majorité souligne que les énergies renouvelables demeurent largement méconnues du grand public.

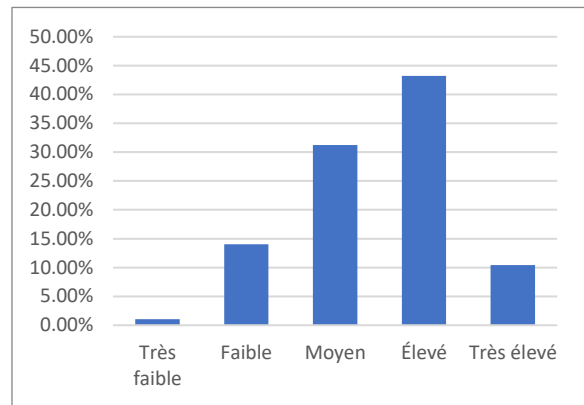


Figure 3.15 Niveau de connaissances des professionnels en matière d'énergies renouvelables

Source : (Auteur, 2022)

Les réponses et les résultats issus de cet axe suggèrent que la plupart des professionnels possèdent un bon niveau de connaissances en ce qui concerne les énergies renouvelables. Ils se montrent disposés à les intégrer dans leurs projets, à condition qu'ils en retirent des avantages et que des facilités soient mises en place pour cela. Ces résultats mettent également en évidence la nécessité d'entreprendre des campagnes de sensibilisation plus vastes auprès du grand public pour mieux faire connaître les avantages et les possibilités offertes par les énergies renouvelables.

7.6. La net zéro énergie

Dans le dernier axe, les professionnels ont été interrogés sur leurs connaissances, opinions et attitudes envers la notion de net zéro énergie (NZE). La première question de cet axe visait à évaluer leur niveau de connaissance sur le sujet. La majorité des professionnels a jugé avoir un niveau de connaissance faible sur cette thématique, avec une infime minorité de 4 % affirmant posséder un bon niveau de connaissance en matière de NZE. En ce qui concerne la probabilité d'atteindre l'objectif NZE en Algérie d'ici à 2050, 60 % des professionnels estiment qu'il est quasiment impossible d'atteindre cet objectif, tandis qu'une minorité de 3.5 % pense que cette réalisation est possible.

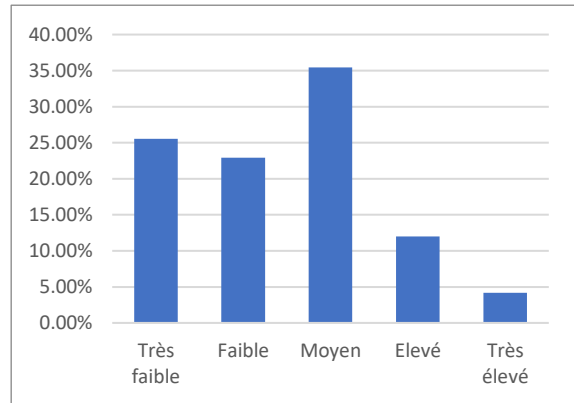


Figure 3.16 niveau de connaissance sur la net zéro énergie

Source : (Auteur, 2022)

En ce qui concerne les changements nécessaires pour atteindre cet objectif d'ici à 2050, la majorité des professionnels pensent qu'il faut effectuer des changements drastiques dans notre mode de vie pour y parvenir. De plus, 78 % d'entre eux estiment que la technologie jouera un rôle très important dans cette transition vers la NZE.

Les professionnels ont également été questionnés sur les différentes solutions pouvant être utilisées pour atteindre cet objectif. Une liste de changements susceptibles d'être intégrés au secteur du bâtiment pour réduire la consommation énergétique et les émissions de carbone en Algérie a été mise à leur disposition. Ils ont été invités à évaluer la faisabilité et les effets de ces stratégies de réduction de la consommation énergétique et des gaz à effet de serre. Parmi les stratégies proposées, celle ayant reçu le plus d'avis positifs est l'utilisation de méthodes d'utilisation des sols plus respectueuses de l'environnement, telle que la plantation d'arbres, avec un taux favorable de 95 %. Viennent ensuite une industrie plus verte (94 %), une meilleure efficacité énergétique (94 %), la réduction des déchets (93 %),

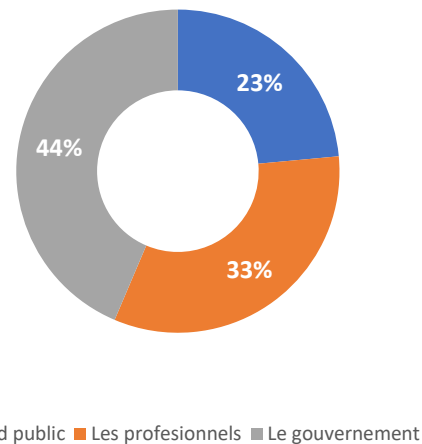


Figure 3.17 La part de responsabilité de chacun des acteurs

Source : (Auteur, 2022)

l'approvisionnement en énergie renouvelable (89 %) et la réduction de la consommation générale (88.5 %). Enfin, l'adoption de technologies pour l'élimination des gaz à effet de serre (88 %) a également reçu un taux d'avis positifs élevé...

En ce qui concerne le rôle et la responsabilité des différents acteurs dans la transition énergétique algérienne vers la NZE, les professionnels considèrent en premier lieu le gouvernement comme le principal responsable. Ils estiment que le gouvernement doit mettre en place des politiques visant à réduire les niveaux de consommation et d'émissions. Les entreprises et l'industrie sont également considérées comme ayant une responsabilité majeure dans cette transition (Figure 3.17).

Les professionnels ont également été interrogés sur leur volonté d'adopter des stratégies menant à la NZE dans le secteur du bâtiment. La stratégie la plus favorable selon eux est la conception passive et bioclimatique, suivie de l'utilisation de technologies intelligentes et d'efficacité énergétique, ainsi que l'adoption d'énergies renouvelables. La majorité des professionnels sont également favorables à l'utilisation de moyens et de logiciels de simulation

énergétique dans la conception de leurs futurs projets. De plus, ils expriment le désir d'avoir un rôle dans la prise de décisions concernant la politique climatique et la transition vers la NZE, à la fois pour leur région/communauté locale et pour l'ensemble du pays (Figure 3.18).

En résumé, les résultats de cet axe confirment que le niveau de connaissance des professionnels en ce qui concerne la net zéro énergie est faible et nécessite davantage d'interventions et de campagnes de sensibilisation. Néanmoins, la majorité de ces professionnels soutiennent le concept de NZE et souhaitent être davantage impliqués dans sa réalisation.

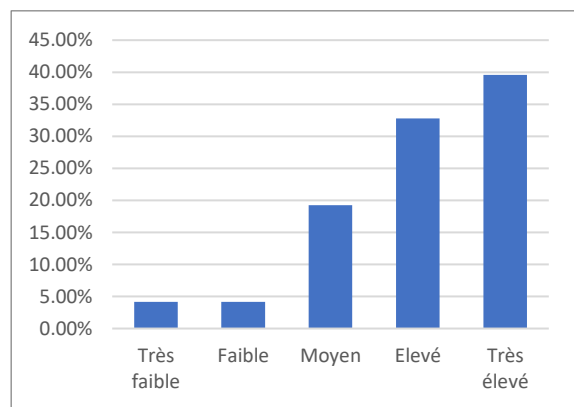


Figure 3.18 Envie de participation aux décisions future
Source : (Auteur, 2022)

Conclusion

Ce chapitre met en lumière la nécessité impérieuse d'un effort multidisciplinaire englobant l'éducation, les politiques, la technologie et la recherche pour guider la transition énergétique de l'Algérie vers un paradigme de neutralité énergétique. L'analyse des données de ce chapitre a clairement démontré l'impératif d'intervenir sur le modèle énergétique en déterminant les modes de production (mix énergétique) et de consommation (efficacité énergétique) afin d'assurer une gestion efficace à long terme. La diversification ainsi envisagée vise à renforcer la résilience du modèle énergétique, à mieux gérer l'épuisement des ressources non renouvelables et à orienter le pays vers une valorisation accrue de ses ressources restantes. Cependant, les données affirment que cette transition est profondément influencée par des facteurs structurels tels que la disponibilité des ressources énergétiques, le climat, le niveau de vie, la structure économique, la démographie, la densité de population, les taux d'équipement et les infrastructures. La création d'un environnement propice à l'innovation et à l'entrepreneuriat, ainsi que le développement de secteurs industriels compétitifs, émergent comme des leviers essentiels pour le succès de cette transition énergétique. Le défi majeur de la politique énergétique de l'Algérie réside dans la conciliation des trois dimensions de la sécurité énergétique : l'aspect économique, environnemental et social. Bien que les préoccupations environnementales aient des implications à l'échelle mondiale et à long terme, elles peuvent entrer en conflit avec les préoccupations économiques liées aux coûts de l'énergie, à la compétitivité des entreprises et à la croissance économique.

L'exploration de ce chapitre a également révélé l'importance cruciale de la réglementation dans l'orientation des choix d'investissement vers des équipements à haut rendement énergétique. La réussite de cette transition énergétique nécessite un environnement propice à l'innovation et à l'entrepreneuriat. Les résultats du questionnaire ont également corroboré l'impératif d'accroître le niveau de connaissance des professionnels dans ce domaine.

Le questionnaire mené auprès des professionnels algériens a éclairé des aspects clés liés à l'efficacité énergétique, aux énergies renouvelables, au changement climatique et à la net zero énergie dans les bâtiments. Les résultats soulignent la nécessité de renforcer les connaissances et l'éducation, tant pour les professionnels que pour la population en général, en matière de durabilité. Ils mettent en évidence qu'une majorité de professionnels reconnaissent l'urgence du changement climatique et de ses implications, nécessitant ainsi une meilleure sensibilisation du public à ce sujet. L'étude démontre également que les

professionnels sont enclins à adopter diverses stratégies de durabilité, incluant des approches passives et actives, ainsi que l'intégration des énergies renouvelables. Cette réponse positive souligne la volonté des professionnels de contribuer à la transition énergétique du pays et met en avant le rôle central du gouvernement dans ce processus.

**CHAPITRE -IV- METHODOLOGIE
D'OPTIMISATION MULTICRITERES
ET 'COST-OPTIMALITY' DE LA NET
ZERO ENERGIE**

Introduction

« La meilleure façon de prédire l'avenir est de le créer »

— Peter Drucker

Les bâtiments à NZE représentent un concept novateur au sein de l'architecture contemporaine, visant à générer annuellement autant d'énergie qu'ils n'en consomment. Ceci est réalisé grâce à une combinaison de conception économe en énergie et de sources d'énergie renouvelable. Néanmoins, le développement de tels bâtiments constitue un processus complexe, nécessitant l'optimisation de divers objectifs tels que l'efficacité énergétique, la rentabilité et l'impact environnemental.

Pour relever ce défi, de nombreuses méthodologies et approches d'optimisation ont été élaborées pour aider les concepteurs et les ingénieurs à mettre en œuvre les méthodes les plus efficaces en vue d'atteindre l'objectif de consommation NZE. Ces méthodologies intègrent fréquemment des modèles mathématiques et des algorithmes afin de déterminer l'ensemble optimal de stratégies de conception et de solutions technologiques. Parmi ces approches, la méthodologie "Cost-Optimality" issue de la Directive sur la Performance Énergétique des Bâtiments (EPBD) propose une démarche structurée pour optimiser la conception des bâtiments à consommation énergétique net zéro, en tenant compte de facteurs tels que la consommation d'énergie, l'optimisation des coûts et les objectifs climatiques à long terme.

Ce chapitre présente la méthodologie utilisée pour l'optimisation des bâtiments NZE. Dans un premier temps, la méthodologie "Cost-Optimality" de la EPBD est résumée, englobant la définition du bâtiment de référence, la sélection de mesures d'efficacité énergétique, le calcul de la consommation énergétique et la détermination des coûts des matériaux, de la main-d'œuvre et de l'équipement. La deuxième partie dissèque les outils visant à améliorer la performance des bâtiments, distinguant les différences entre la Simulation de Performance des Bâtiments (BPS) et l'Optimisation de Performance des Bâtiments (BPO). Pour la troisième partie, la méthodologie d'optimisation multicritère des coûts utilisant l'énergie et les coûts du cycle de vie comme fonctions objectives est détaillée. L'approche d'optimisation comprend plusieurs étapes, ainsi que son application à l'optimisation de la performance des bâtiments. Enfin, la dernière partie de ce chapitre se concentre sur une analyse approfondie des éléments essentiels. Cela implique la définition du bâtiment de référence, la compréhension des paramètres d'occupation et des dynamiques

opérationnelles, ainsi que la calibration et la validation ultérieures du modèle de simulation utilisé.

En conclusion, ce chapitre aboutit à une synthèse méthodologique spécifiquement ajustée à notre étude et à notre cadre de recherche. Cette synthèse englobe une discussion des étapes cardinales inhérentes à l'optimisation des bâtiments net zéro énergie. En outre, elle examine minutieusement la manière dont ces étapes peuvent être concrètement mises en œuvre, démontrant ainsi la pragmatique intrinsèque à leur application.

1. Méthodologie de l'optimisation des coûts

Au cours de la dernière décennie, les politiques relatives aux bâtiments à l'échelle mondiale ont élargi leurs champs d'application et leurs domaines d'influence, se dirigeant vers une approche intégrée qui prend en compte les aspects énergétiques, environnementaux, financiers et de confort. Le concept d'optimisation des coûts a été introduit dans la révision de l'EPBD à la suite de consultations approfondies au sein de l'UE, révélant un potentiel significatif d'économies d'énergie rentables au sein du secteur du bâtiment. Cette révision garantit que les exigences minimales de performance énergétique pour les bâtiments sont établies de manière à atteindre des niveaux rentables grâce à l'utilisation d'un cadre méthodologique comparatif, marquant ainsi un développement crucial au sein d'un document officiel définissant les exigences en matière d'efficacité énergétique.

Par ailleurs, transcendant la simple mise en exergue des coûts d'investissement, il se révèle impérieux d'intégrer la valeur ajoutée engendrée par les améliorations de l'efficacité énergétique, ainsi que les bénéfices résultant d'une efficacité accrue (Tian et al., 2018). À cet égard, l'EPBD a édicté l'obligation de construire des édifices à quasi consommation énergétique nulle à partir de 2020, en instaurant des paramètres de performance énergétique minimaux pour les édifices, leurs composantes et les systèmes techniques de construction, en se fondant sur une approche d'optimisation des coûts qui s'étend tout au long du cycle de vie du bâtiment (Thomsen et al., 2013).

L'EPBD englobe plusieurs articles définissant diverses mesures pour améliorer l'efficacité énergétique des bâtiments. Le premier article transmet des aperçus généraux concernant la révision, tandis que le deuxième article fournit des définitions clés pertinentes pour le sujet en discussion. Le troisième article détaille l'adoption d'une méthodologie pour le calcul de la performance énergétique des bâtiments, tandis que le quatrième article stipule les exigences minimales de performance énergétique. Le cinquième article approfondit le calcul des niveaux optimaux en fonction des coûts de performance énergétique. Les articles suivants, du sixième au huitième, se rapportent tant aux bâtiments neufs qu'existants ainsi qu'aux systèmes techniques du bâtiment. Le neuvième article aborde la quasi-consommation énergétique nulle, et le dixième article se penche sur les incitations financières et les barrières du marché. Les articles onze à treize traitent de la certification de la performance énergétique, tandis que les articles quatorze à trente-et-un abordent les inspections, les rapports, les délégations et les régulations générales. L'EPBD s'efforce d'élever l'efficacité énergétique des bâtiments européens, réduisant ainsi leur empreinte environnementale et garantissant une consommation d'énergie durable et efficiente (BPIE, 2010).

1.1. Processus de mise en œuvre de l'optimisation des coûts

Le cadre méthodologique comparatif de l'optimisation des coûts vise à élaborer des exigences minimales de performance énergétique optimales en fonction des coûts. Les cinq étapes fondamentales de l'analyse coût-optimalité doivent être appliquées à différentes catégories de bâtiments. En se fondant sur les directives du contenu (CE 2012/C 115/01 2012), les étapes de l'analyse sont succinctement évoquées dans les passages avenir (*Thomsen et al., 2013*).

1.1.1. Définition du bâtiment de référence

En prenant en considération la fonctionnalité et les conditions climatiques, les bâtiments de référence doivent être aussi représentatifs que possible afin de refléter le parc immobilier national réel. Cela englobe les bâtiments résidentiels et non résidentiels, qu'ils soient neufs ou existants, avec une catégorisation appropriée, notamment : maisons individuelles, immeubles résidentiels, bureaux, établissements hôteliers et de restauration, édifices éducatifs, établissements hospitaliers et autres types de bâtiments consommateurs d'énergie.

1.1.2. Sélection des mesures d'efficacité énergétique

L'application du principe de la 'Trias Energetica 'est fondamentale lors de l'identification des mesures d'efficacité énergétique (EEM) soumises à évaluation pour les bâtiments de référence. Ces mesures peuvent englober des approches concernant des bâtiments entiers, des éléments spécifiques de construction, ou une combinaison d'éléments de construction :

1. Réduction de la demande d'énergie par la mise en œuvre de stratégies passives.
2. Faire appel à des dispositifs à efficacité énergétique élevée et recourir de manière restreinte aux sources d'énergie fossile, uniquement en cas d'indisponibilité d'options durables.
3. Intégration de sources d'énergie renouvelable, notamment l'énergie solaire, éolienne, hydraulique, géothermique et la biomasse.

L'évaluation de la performance énergétique du bâtiment requiert la définition d'une gamme de combinaisons de variantes/paquets. Cette gamme doit comprendre au moins dix variantes en sus du cas de référence.

1.1.3. Calcul de la consommation d'énergie

L'objectif de la procédure de calcul est d'évaluer les besoins en énergie finale et primaire des bâtiments de référence en calculant l'impact de différents paquets de mesures. Y compris

la consommation d'énergie pour le chauffage, le refroidissement, la ventilation, l'eau chaude sanitaire et autres services du bâtiment.

1.1.4. Calcul du coût

L'évaluation des coûts des mesures d'efficacité énergétique appliquées aux bâtiments de référence est réalisée en tenant compte du cycle de vie économique prévu. Cette évaluation incorpore les coûts initiaux d'investissement, les dépenses d'entretien et d'exploitation, ainsi que les recettes générées par l'énergie produite, le tout rapporté à l'année de commencement de la période de calcul.

1.1.5. La 'Cost-optimality'

L'établissement de graphiques d'optimisation des coûts repose sur les calculs de consommation énergétique et de coûts globaux associés aux différentes variantes de mesures évaluées pour le bâtiment de référence. Ces graphiques illustrent la consommation d'énergie primaire (axe des abscisses : kWh/(m²an)) et les coûts globaux (axe des ordonnées : €/m²) des solutions divergentes (Figure 4.1). Une mesure ou une combinaison de mesures est considérée comme économiquement viable lorsque le coût de mise en œuvre est inférieur à la valeur des avantages générés sur la durée de vie envisagée de la mesure.

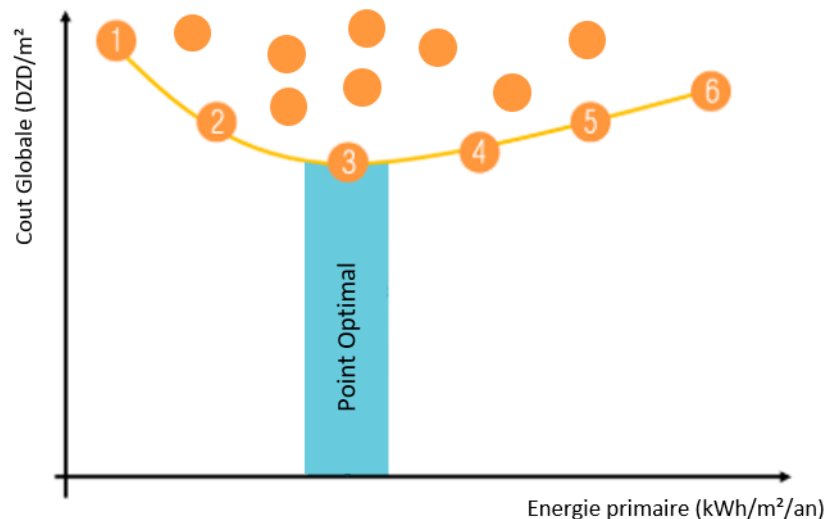


Figure 4.1 Courbe de coût et d'optimum économique de différentes stratégies

Source : (Auteur, 2022)

Cet outil se révèle essentiel pour évaluer les écarts financiers, énergétiques et environnementaux entre les niveaux optimaux de coûts et les niveaux de performance NZE des bâtiments. Il est également d'une grande utilité pour élaborer et mettre en œuvre des politiques visant à réduire ces écarts. En réalité, la gamme des coûts optimaux ne se présente

que rarement sous la forme d'un ensemble unique de mesures appliquées à un bâtiment de référence. Elle se manifeste plutôt sous la forme d'une série de solutions, chacune ayant sa propre validité ou optimalité relative en termes de coûts. En conséquence, pour chaque type de bâtiment, une gamme, voire un "nuage", de points émergera, dépendant du bâtiment ainsi que des combinaisons de variantes optimales en termes de coûts utilisées dans l'évaluation de la coût-optimalité. Note : Les concepts de coût-efficacité et de coût-optimalité sont interconnectés, mais distincts, le second étant une sous-catégorie du premier. Les deux reposent sur la comparaison des coûts et des économies (évaluées) d'une action potentielle, en l'occurrence, l'exigence d'un niveau spécifique de performance énergétique minimale pour les bâtiments. En général, une mesure ou un ensemble de mesures est économiquement viable lorsque le coût de mise en œuvre est inférieur à la valeur des avantages réalisés pendant la durée de vie envisagée de la mesure (Thomsen et al., 2013) (Ferrara et al., 2018) (Buso, 2017).

2. Méthodologie d'optimisation des performances des bâtiments

Le schéma conventionnel de conception des bâtiments, dépourvu d'objectifs spécifiques en matière d'énergie et d'environnement, présente généralement une linéarité. L'architecte prend en charge l'emplacement, l'orientation, la forme et l'enveloppe du bâtiment ; les ingénieurs en structure et en électricité s'occupent de leurs systèmes respectifs ; tandis que l'ingénieur en mécanique choisit et dimensionne le système de chauffage, ventilation et climatisation (CVC) approprié. La lacune inhérente à ce processus réside dans le fait que des décisions majeures irrévocables, telles que la forme et l'orientation, sont parfois prises sans tenir compte des performances énergétiques.

Lorsqu'il s'agit de concevoir des bâtiments NZE, la consommation d'énergie, l'impact environnemental et le confort sont des facteurs cruciaux. Il est essentiel de prendre des décisions éclairées dès les premières phases de la conception, car celles-ci exercent un impact significatif sur la consommation énergétique du bâtiment et sur sa capacité à intégrer les énergies renouvelables. Par conséquent, il devient impératif de recueillir des informations dès le début du processus de conception, non seulement sur la consommation énergétique du bâtiment, mais aussi sur les dimensions économiques, environnementales et de confort. Les outils de simulation de la performance des bâtiments se révèlent utiles pour obtenir ces informations.

2.1. Optimisation et Simulation des performances des bâtiments

L'optimisation de la performance des bâtiments (BPO) en conjonction avec la simulation de la performance des bâtiments (BPS) représente une approche prometteuse pour évaluer un large éventail d'options de conception et parvenir à une solution optimale, voire quasi-optimale, pour un objectif donné ou une combinaison d'objectifs (tels que le coût du cycle de vie minimal, la performance énergétique maximale, le confort thermique optimal), tout en respectant les contraintes préétablies (comme l'objectif NZE). Ces méthodes ont été largement discutées dans la littérature (Charron, 2005) (Bucking, 2013). Historiquement, les bâtiments ont été conçus en utilisant des règles heuristiques, fragmentant le processus de conception en plusieurs phases impliquant diverses disciplines (architectes, ingénieurs en mécanique, en structure, en électricité, etc.). L'optimisation, en identifiant et en évaluant les paramètres clés de conception, peut favoriser la cohérence entre les différentes disciplines et les étapes de conception.

2.2. Simulation de la performance des bâtiments (BPS)

La BPS, est une méthode permettant de prévoir la performance d'un bâtiment avant sa construction, existe depuis les années 1960. L'objectif actuel de réaliser des performances absolues (comme l'énergie net zéro) engendre une demande croissante pour des outils de BPS à la fois plus conviviaux et plus précis. Actuellement, l'application la plus courante du BPS consiste à démontrer que le bâtiment envisagé surpasse un cas de référence prédéfini (par exemple, la norme ASHRAE 90.1). Il existe plusieurs outils de simulation de la

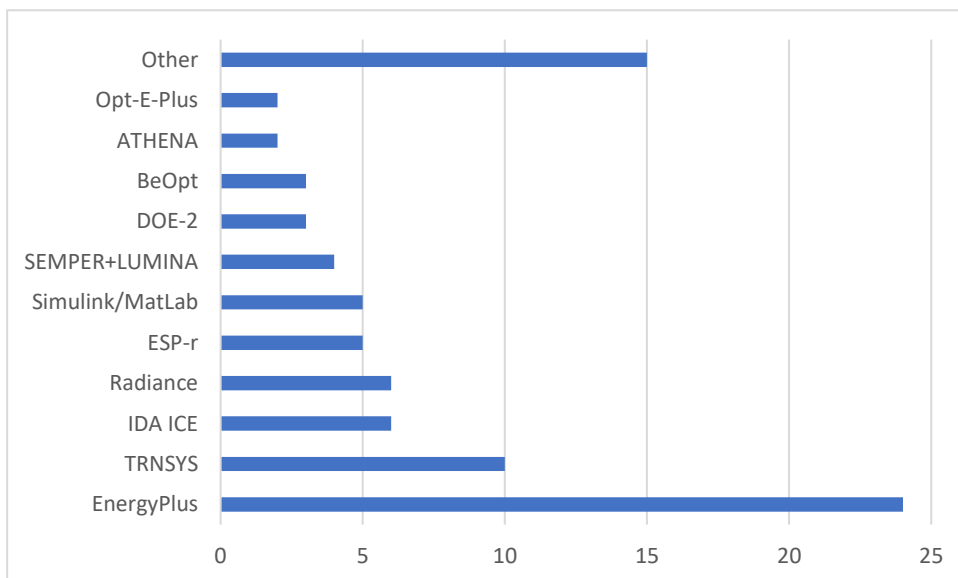


Figure 4.2 Statistique du nombre d'études effectuées avec différents BPS

Source : (Athienitis & O'Brien, 2015).

performance des bâtiments (BPS) dans lesquels O'Brien et al. ont fait une liste des plus fréquemment utilisés (Figure 4.2) (Athienitis & O'Brien, 2015).

2.3. L'optimisation de la performance des bâtiments (BPO)

Étant donné que l'optimisation de la performance des NZE est un objectif primordial, la quantité et la complexité des mesures d'efficacité énergétique sous-tendant le concept énergétique peuvent être substantielles. L'objectif de performance des NZE élève le niveau des performances attendues des bâtiments et modifie la façon dont ils sont conçus et exploités. Cette dynamique implique que l'évaluation des multiples options de conception est plus complexe que jamais. Étant donné que la géométrie, l'enveloppe et de nombreux systèmes du bâtiment interagissent les uns avec les autres, une approche privilégiée consiste à optimiser simultanément le bâtiment et ses systèmes. L'association de la BPO avec la BPS se révèle ainsi une solution prometteuse pour évaluer diverses options de conception et obtenir des solutions optimales. Plusieurs moteurs de simulation énergétique sont couramment utilisés à différentes étapes du processus de conception d'un bâtiment, O'Brien et al. illustre la distribution de la fréquence d'utilisation de ces logiciels conformément à son étude (Figure 4.3).

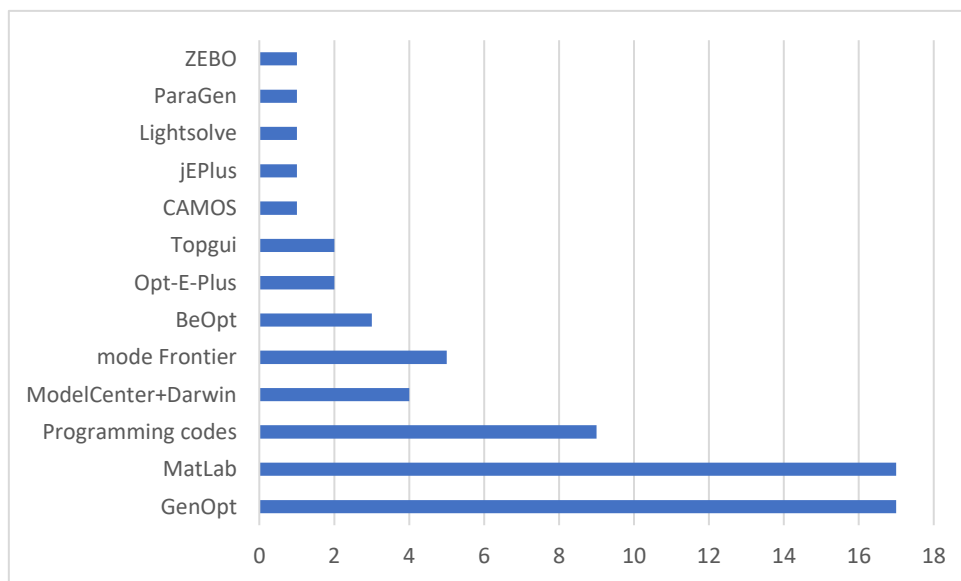


Figure 4.3 Statistique du nombre d'études effectuées avec différents BPO

Source : (Athienitis & O'Brien, 2015).

L'objectif de l'optimisation automatisée de la performance des bâtiments est de sélectionner, parmi une série d'alternatives disponibles, la solution optimale pour un problème de conception ou de contrôle donné. Ce choix s'effectue en fonction d'un ensemble de critères et de contraintes de performance. Les objectifs d'optimisation pour la NZE

incluent l'analyse des impacts sur le coût, l'énergie, l'impact environnemental (comme l'énergie intrinsèque et le cycle de vie des matériaux), le confort et la qualité de l'air intérieur. Les techniques de visualisation peuvent contribuer à extraire des informations pertinentes sur les compromis en matière de performances. Le concepteur peut également interagir avec le processus d'optimisation en fournissant une visualisation pendant la procédure. Cette approche hybride fusionne la conception traditionnelle avec l'optimisation (Athienitis & O'Brien, 2015).

3. Optimisation multi-objectifs de l'optimalité des coûts

Afin d'établir et de déterminer la courbe optimale des coûts par rapport à d'autres variantes, il est nécessaire de définir un problème d'optimisation multi-objectifs avec plusieurs fonctions objectives, le problème d'optimisation est représenté par l'équation 4.1 :

$$\text{Min } \{f_1(\bar{x}), f_2(\bar{x}), \dots, f_m(\bar{x})\} \quad \bar{x} = [x_1, x_1, \dots, x_m] \quad (4.1)$$

Avec :

f_1 : Première fonction

f_2 : Deuxième fonction

\bar{x} : Combinaison des variables de conception (x_1, x_1, \dots, x_m).

m : Nombre de variables de conception.

Une enquête menée par Longo et al. (Longo et al., 2019) portant sur 73 études visait à évaluer les facteurs les plus fréquemment examinés dans le contexte des bâtiments à consommation énergétique net quasi nulle (nZEB) à l'aide de systèmes d'optimisation multi-objectifs (Figure 4.4).

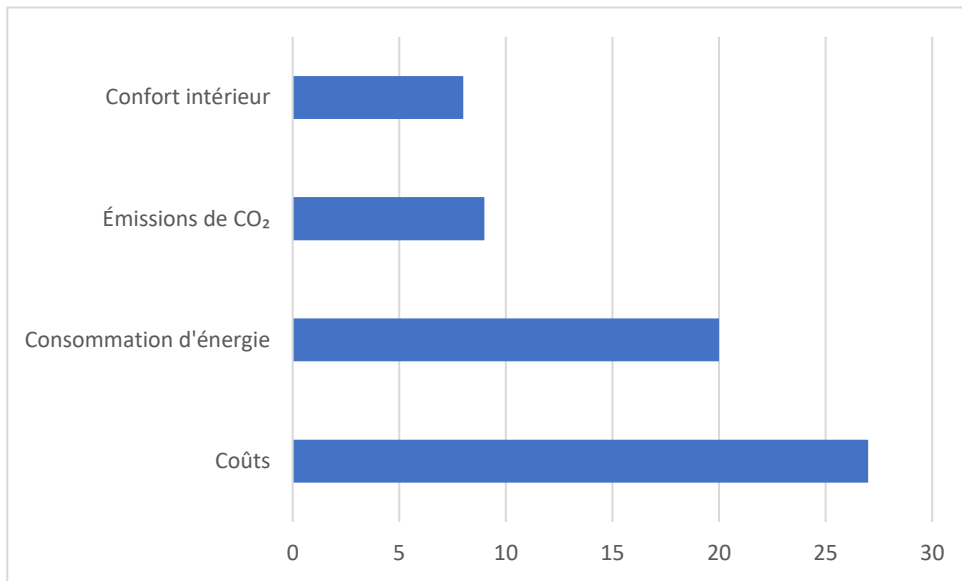


Figure 4.4 Les objectifs considérés pour les études NZE

Source : (Longo et al., 2019)

Il est à noter que les paramètres économiques ressortent comme les aspects les plus ciblés dans diverses études visant à atteindre des solutions optimales pour les bâtiments. Bien que de nombreuses démarches ne poursuivent pas directement des solutions optimales en termes de coût, elles évaluent généralement les coûts d'investissement. La consommation énergétique suit de près, maintenant toujours une importance, car les dépenses opérationnelles intègrent intrinsèquement les coûts énergétiques. Les émissions de dioxyde de carbone sont principalement évaluées à travers la consommation énergétique du bâtiment, certaines études ayant également recours à l'analyse du cycle de vie (LCA). Le confort intérieur, englobant le confort thermique et visuel, est généralement évalué à l'aide d'indicateurs synthétiques tels que le Prédit Moyen Vote (PMV), le Pourcentage Prédit d'Insatisfaction (PPD) et les heures d'inconfort. Le confort visuel est évalué à l'aide de l'Éclairage Diurne Utile (UDI) et de l'Indice d'Éblouissement de l'Inconfort (DGI) (Longo et al., 2019).

Dans notre cas spécifique, nous avons formulé un problème d'optimisation bi-objectif, la première fonction objectif représentant la consommation énergétique et la seconde étant le coût. En combinant les coûts liés à l'énergie et les coûts du cycle de vie (ERC ; LCC) :

$$\text{Min} \{f_1(\bar{x}), f_2(\bar{x})\} \quad \bar{x} = [x_1, x_1, \dots, x_m] \quad (4.2)$$

Avec :

f_1 : Consommation énergétique site (SEC).

f_2 : les coûts liés à l'énergie et les coûts du cycle de vie (ERC ; LCC).

\bar{x} : Combinaison des variables de conception (x_1, x_1, \dots, x_m).

m : Nombre de variables de conception.

3.1. Le problème d'optimisation

3.1.1. Consommation d'énergie du site (Première fonction)

En tant que première fonction objective, la consommation d'énergie site est minimisée afin d'obtenir des solutions qui traitent des objectifs environnementaux émis. Lors de la COP26, l'énergie primaire est la mesure la plus favorable étant donné qu'elle traite la consommation énergétique du bâtiment en lui-même, mais aussi de l'énergie primaire nécessaire à l'usine calculée en appliquant des facteurs d'énergie primaire non renouvelable à la source d'énergie (Hamdy et al., 2013) (Zhao & Du, 2020).

L'énergie du site est aussi une mesure nécessaire sur laquelle on va se baser puisqu'elle facilite la compréhension et le calcul des différentes consommations.

3.1.2. Coût du cycle de vie et Coûts liés à l'énergie (Deuxième fonction)

Le coût du cycle de vie (LCC) est largement utilisé pour évaluer la viabilité financière des projets et dans la recherche sur les bâtiments à haut rendement énergétique. Il s'agit d'une méthode appropriée pour comparer, classer et estimer la viabilité financière des diverses options d'un projet spécifique. En outre, elle facilite l'évaluation des avantages financiers des projets d'économie d'énergie sur leur durée de vie. Le LCC est la somme de la valeur actuelle des coûts d'investissement et d'exploitation des systèmes de construction et de service, y compris les coûts de maintenance et de remplacement, plus les taxes, sur une période de calcul donnée.

Les équations 4.3 et 4.4 donnent le LCC :

$$LCC = CI + USPW(N, rd) \times CE \quad (4.3)$$

$$VASU(N, taa) = \frac{1 - (1 + rd)^{-N}}{rd} \quad (4.4)$$

Avec

LCC Coût du cycle de vie (\$)

CI Coût initial de la mise en œuvre des caractéristiques de conception et d'exploitation de l'enveloppe du bâtiment et du système de LCC (\$)

$VASU(N, taa)$ Facteur de valeur actuelle des séries uniformes qui convertit les dépenses récurrentes futures en coûts actuels (année)

taa Taux d'actualisation annuel (%)

N Durée de vie (année)

CE Coût annuel de l'énergie nécessaire pour maintenir le confort intérieur du bâtiment pour les caractéristiques de conception et de fonctionnement choisies (\$).

Les coûts liés à l'énergie, quant à eux, englobent les coûts totaux découlant de l'utilisation, c'est-à-dire la consommation, des divers équipements du bâtiment. Ils peuvent être calculés par la sommation des différentes consommations associées à chaque équipement. L'équation 4.5 se révèle être un outil adéquat pour parvenir à la résolution de leurs calculs de manière méthodique et efficiente :

$$ERC = \sum_{i=1}^n \text{Consommation } i \times \text{Coût unitaire } i \quad (4.5)$$

Avec :

n Représente le nombre d'équipements ou de composants différents.

$Consommation i$ Est la consommation du i ème équipement.

$Coût unitaire i$ Est le coût unitaire associé à la consommation du i ème équipement.

3.2. Optimisation Multi-étapes (Multi-phasage)

3.2.1. Utilisation de la méthode d'optimisation en plusieurs étapes

La méthodologie présente un processus de simulation en plusieurs étapes qui permet de minimiser la charge de simulation nécessaire pour identifier des solutions de construction énergétique fiables et optimales en termes de coûts pour tout bâtiment. Ce processus multi-étape permet de réduire considérablement les temps de calcul par rapport aux approches habituelles, en assurant, en même temps, l'exploration rigoureuse d'un vaste domaine de scénarios énergétique. L'un des principaux avantages des approches multi-étapes par rapport aux approches régulières basées sur la simulation totale est la réduction substantielle des temps de calcul. En effet, les approches régulières effectuent une seule étape d'optimisation en considérant tous les types de stratégies. Par conséquent, le nombre de variables de conception de l'optimisation basée sur la simulation augmente par rapport à l'approche multi-étapes adoptée, ce qui nécessite un nombre plus élevé d'itérations (Ascione et al., 2016)

(Hamdy et al., 2013). Par exemple, si nous avons 10 variables dans chaque mesure, et que nous avons 5 mesures de stratégies passives, le nombre d'itérations et de simulations nécessaires serait de $(10 \times 10 \times 10 \times 10 \times 10)$, soit 100 000 simulations nécessaires, par rapport à l'utilisation d'une approche à plusieurs étapes qui essaie d'optimiser les 10 variables avant de faire la simulation totale, en réduisant par exemple le nombre de variables de 10 à 3 variables optimales avec $(3 \times 3 \times 3 \times 3 \times 3)$, soit 243 simulations. On peut résumer cette approche par les étapes suivantes :

- Première étape d'optimisation : Des groupes de mesures préliminaires sont évalués séparément pour choisir la solution optimale parmi les mesures (par exemple, orientation, types de fenêtres, ratio fenêtre/mur), les simulations sont basées sur le coût et l'énergie.
- Deuxième étape d'optimisation : Optimisation des groupes principaux (ex. stratégies passives, équipement à haute efficacité, énergies renouvelables), les simulations sont basées sur le coût et l'énergie.
- Troisième étape d'optimisation : Optimisation des résultats généraux (tous en même temps)
- Étape optionnelle : Optimisation des résultats en utilisant les émissions de CO₂.

3.3. Ligne de Pareto

Le rôle de l'algorithme d'optimisation réside dans l'identification des solutions situées sur la courbe de compromis, également connue sous le nom de frontière de Pareto. Cette frontière regroupe les solutions optimales qui sont représentées sous forme de courbe, et elle tire son nom de l'économiste italo-français Vilfredo Pareto. Ces solutions partagent toutes la caractéristique essentielle qu'aucun des objectifs ne peut être amélioré sans détériorer les performances d'un autre objectif (Athienitis & O'Brien, 2015).

Le front de Pareto est constitué d'un ensemble de solutions qui surpassent ou sont au moins équivalentes, en termes de qualité, à toutes les autres solutions pour chaque critère, et qui surpassent strictement les autres solutions pour au moins un critère. Lorsqu'une telle situation se présente, on parle de domination d'une solution sur les autres (Figure 4.5).

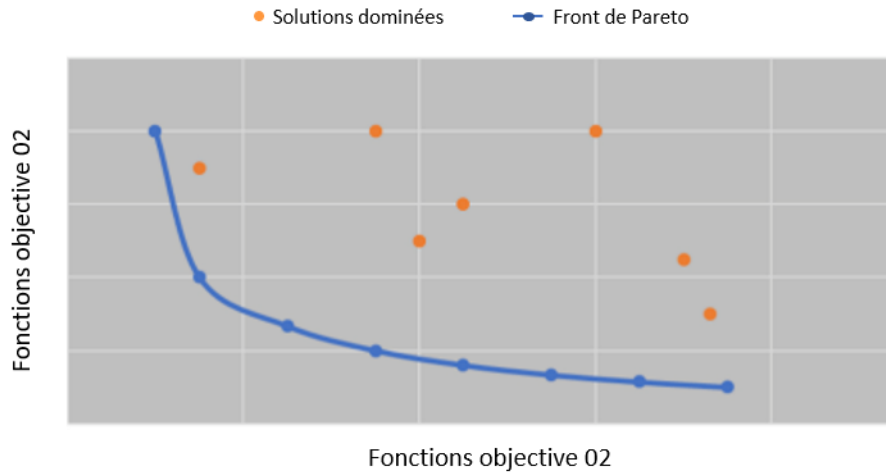


Figure 4.5 Exemple de ligne de Pareto

Source : (Longo et al., 2019)

4. Résumé de la méthodologie

La méthodologie mise en œuvre, ajustée en fonction de notre cas d'étude et de notre contexte, peut être succinctement résumée de la manière suivante :

4.1. Définition des bâtiments de référence

Dans cette première phase, les étapes suivantes sont entreprises pour collecter et traiter les données :

- Estimation de la sensibilisation des professionnels aux mesures d'efficacité énergétique, aux changements climatiques et au concept d'énergie net zéro pour le secteur du bâtiment à travers un questionnaire.
- Étude et sélection des types de bâtiments résidentiels les plus courants et représentatifs.
- Caractérisation des matériaux de construction les plus utilisés.
- Caractérisation des conditions climatiques, notamment la température, l'irradiation solaire, les précipitations et le vent, en utilisant un fichier climatique approprié (basé sur les données météorologiques disponibles ou sur des bases de données climatiques).
- Compilation et simplification des termes et concepts les plus importants liés à l'énergie dans les bâtiments.

4.2. Définition des variables de conception

Dans la deuxième phase, les étapes suivantes sont entreprises pour définir et sélectionner des ensembles/variantes de mesures énergétiques et économiques :

- Choix des ensembles/variantes de mesures à utiliser dans les différentes étapes de simulation, comme les stratégies passives, les stratégies actives et l'utilisation des énergies renouvelables.
- Définition des aspects économiques tels que le prix de l'énergie, la valeur nette actuelle et les coûts du cycle de vie

4.3. Optimisation énergétique

Dans cette troisième phase, une simulation est effectuée en utilisant les résultats de la première phase dans un processus d'optimisation. Le modèle de bâtiment résidentiel est analysé à l'aide de la simulation énergétique dynamique et de l'outil d'optimisation BEopt, développé par le National Renewable Energy Laboratory (NREL) aux États-Unis. Le calcul dans BEopt repose sur la simulation énergétique basée sur EnergyPlus, développée par le Lawrence Berkeley National Laboratory et le département de l'énergie américain. Ceci permet de tester différentes stratégies et d'évaluer leurs impacts sur la consommation énergétique du bâtiment, en calculant la valeur nette actuelle et le coût de cycle de vie pour trouver les scénarios optimaux en termes de coûts et d'énergie. Cette phase comprend les étapes suivantes :

- Exécution de la simulation énergétique en utilisant BEopt, avec calibration du modèle de référence de la première phase.
- Analyse paramétrique du modèle de référence pour l'optimisation énergétique en appliquant diverses stratégies et techniques de conception de la deuxième phase.
- Synthèse basée sur les résultats de la simulation et de l'optimisation dynamique.

4.4. Optimisation économique

La quatrième phase, l'optimisation économique, vise à identifier l'ensemble de stratégies le plus rentable dans différentes catégories (stratégies passives et actives, comme les murs, les types de fenêtres, etc.) afin de déterminer les variables de conception du bâtiment les plus optimales pour atteindre l'énergie nette zéro à moindre coût. Ces résultats sont ensuite comparés aux prix de l'énergie (gaz naturel et électricité).

4.5. Optimum économique : Aperçu de la performance énergétique et financière des paquets de mesures (développement et application des instruments)

Dans la cinquième phase, les résultats sont résumés et analysés pour obtenir l'optimum économique de la performance énergétique et financière. Les étapes comprennent :

- Évaluation de la performance énergétique des paquets de mesures.
- Évaluation de la performance financière des paquets de mesures dans le contexte des futurs changements climatiques.
- Détermination de l'optimum économique en utilisant la méthode de Pareto.

4.6. Recommandations pour les architectes et futures exigences minimales pour les bâtiments résidentiels.

Dans la sixième phase, des exigences minimales et une feuille de route pour atteindre l'énergie net zéro sont proposées en suivant ces étapes :

- Proposition d'une feuille de route pour atteindre l'énergie net zéro et pour l'adoption d'exigences minimales.

La méthodologie adoptée au sein de cette étude est reformulée de manière synthétique (Figure 4.6).

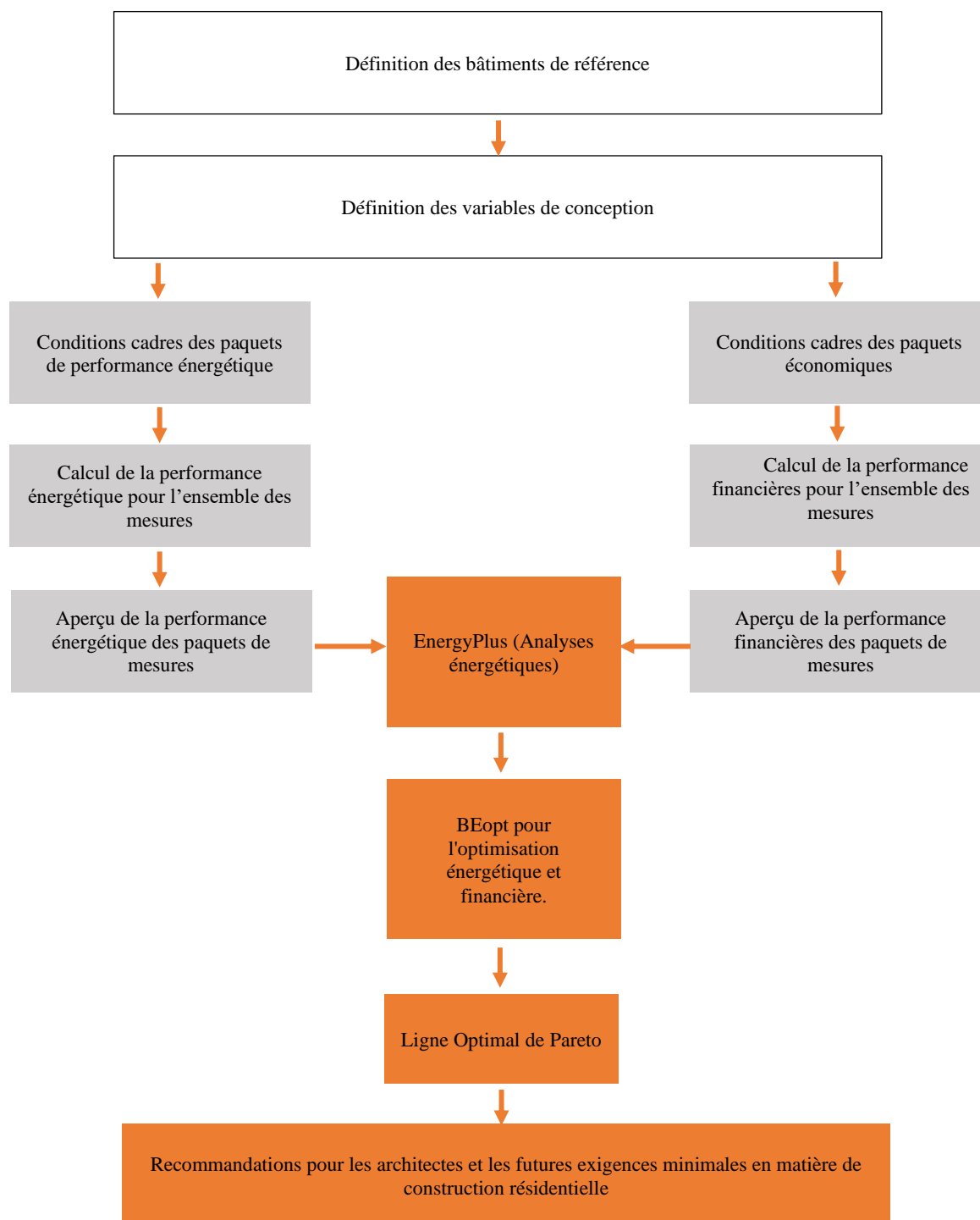


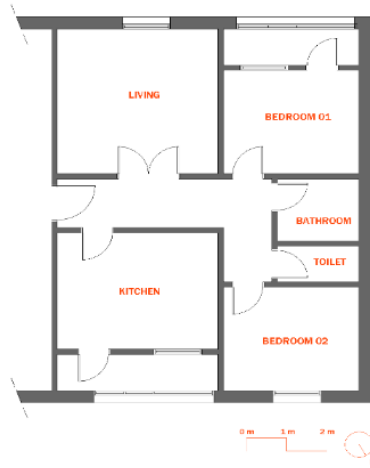
Figure 4.6 Méthodologie utiliser

Source : (Auteur, 2022)

5. Description du bâtiment étudié

Dans la perspective d'entreprendre une exploration méthodique et rigoureuse, la sélection d'un édifice représentatif trouve sa justification en tant que reflet des caractéristiques inhérentes au contexte architectural algérien. Cette délibération attentive est orientée vers l'établissement d'une base conceptuelle solide, laquelle s'avère essentielle pour aborder une série étendue de simulations.

L'étude de cas envisagée porte sur une configuration architecturale résidentielle collective de forme rectangulaire épurée, se composant de cinq niveaux, chaque niveau abritant deux appartements. Situé à Constantine, Algérie (à une altitude de 603 m), cet édifice est agencé avec une orientation angulaire de 30° par rapport à l'axe Nord/Sud. Chaque étage englobe une paire d'appartements distincts. Le premier modèle est un appartement de type 'F3' englobant 75 m², comprenant deux chambres, une cuisine, un salon, une salle de bains et des toilettes. Subséquemment, l'autre unité est un appartement de type 'F4' s'étendant sur 85 m², et se composant de trois chambres, une cuisine, un salon, une salle de bains et des toilettes (Figure 4.7). L'appartement étudié occupe une surface de 75 m² et se situe au premier niveau. Les attributs de cet appartement englobent une chambre et un salon orientés sud/est, ainsi qu'une deuxième chambre et une cuisine orientée Nord/Est. Les ouvertures, exécutées en aluminium à simple vitrage, participent à un taux de fenestration par rapport au mur (WWR) évalué à 22% (Makhloufi & Louafi, 2022).



(a) Plan de l'appartement



(b) Façade



(c) Plan de masse



(d) Coupe longitudinale du bâtiment

Figure 4.7 Bâtiment cas d'étude (Plan, façade, plan de masse)

Source : (Makhloufi & Louafi, 2022)

6. Protocole de mesure sur site du cas d'études

Le protocole de mesure de la température dans l'appartement a été élaboré en se basant sur la norme ASHRAE 55, qui spécifie les conditions thermiques acceptables pour les occupants. Conformément à la section 5.2.2.1 (Emplacements de Mesure de la Température de l'Air) de cette norme.

Diverses mesures, prenant en considération la température et l'humidité du cas d'étude ont été réalisées dans le but d'apporter une contribution cruciale à la validation et à la calibration ultérieure du modèle. Ces mesures ont été effectuées à l'aide de quatre appareils PCE-HT 71N déployés dans différentes pièces de l'appartement (salon, cuisine et les deux chambres). Un second appareil, Delta OHM HD 32.3, a également été utilisé pour valider les données des autres appareils et enrichir les données relatives à l'humidité (Figure 4.8). (Figure 4.9).

Chacun des appareils PCE-HT 71N a été positionné au centre des pièces, à une hauteur d'un mètre du sol, tandis que le Delta OHM a été placé au centre de la pièce avec son trépied. Les mesures ont été effectuées sur une période d'une semaine, du 30 juin 2022 au 8 juillet 2022, totalisant 1113 mesures avec un intervalle de 10 minutes.

Les températures moyennes enregistrées sont les suivantes : 30,4 °C pour le salon, 31,7 °C pour la cuisine, 28,5 °C pour la première chambre et 29,8 °C pour la dernière chambre. Ces données contribuent significativement à la rigueur méthodologique de l'étude en cours.



Figure 4.8 Appareil de mesure PCE-HT 71N
Source : (pce-instruments.com, 2023)



Figure 4.9 Appareil de mesure delta OHM HD32.3
Source : (deltaohm.com, 2023)

7. BEopt : Outil de simulation et d'optimisation énergétique des bâtiments

Le logiciel BEopt™ (Building Energy Optimisation Tool) constitue une plateforme avancée dédiée à l'évaluation de la conception des bâtiments résidentiels, visant à identifier les mesures d'efficacité énergétique optimales tout au long du continuum vers la neutralité énergétique. Ce système polyvalent s'applique aussi bien à l'analyse de nouvelles constructions qu'à la rénovation de bâtiments existants, en exploitant trois modalités d'évaluation énergétique distinctes : les conceptions uniques, les balayages paramétriques et les optimisations basées sur les coûts. BEopt offre une analyse approfondie fondée sur des simulations, prenant en compte des paramètres spécifiques de chaque bâtiment tels que la surface, l'architecture, l'occupation, l'emplacement géographique, l'enveloppe, l'équipement, les matériaux, et les coûts associés. Les simulations sont exécutées à l'aide d'EnergyPlus, le moteur de simulation prééminent du département de l'Énergie des États-Unis. Les hypothèses de simulation s'alignent sur les normes ANSI/RESNET/ICC et les protocoles de simulation de l'habitat (Wilson, 2015).

Pour optimiser l'utilisation efficace de la fonction d'optimisation, BEopt est doté d'une interface utilisateur conviviale, intégrant les fonctionnalités suivantes (Figure 4.10) (Christensen et al., 2005) :

- Une fenêtre d'entrée principale, permettant à l'utilisateur de choisir parmi une multitude d'options préconfigurées celles qui seront exploitées lors de l'optimisation.
- Une fenêtre de sortie, offrant à l'utilisateur une visualisation détaillée des résultats pour plusieurs conceptions de bâtiments optimales et quasi-optimales.
- Une feuille de calcul de la bibliothèque d'options, permettant à l'utilisateur d'examiner et de modifier des informations détaillées sur l'ensemble des options disponibles.
- Le calcul des économies d'énergie comparativement à une référence, définie par l'utilisateur comme un bâtiment de base.
- La gestion de cas multiples, facilitant l'analyse de divers climats, paramètres économiques, caractéristiques du système photovoltaïque (PV) ou options spécifiques sélectionnées pour l'optimisation.
- Des graphiques combinés, facilitant la comparaison des résultats de différents scénarios.

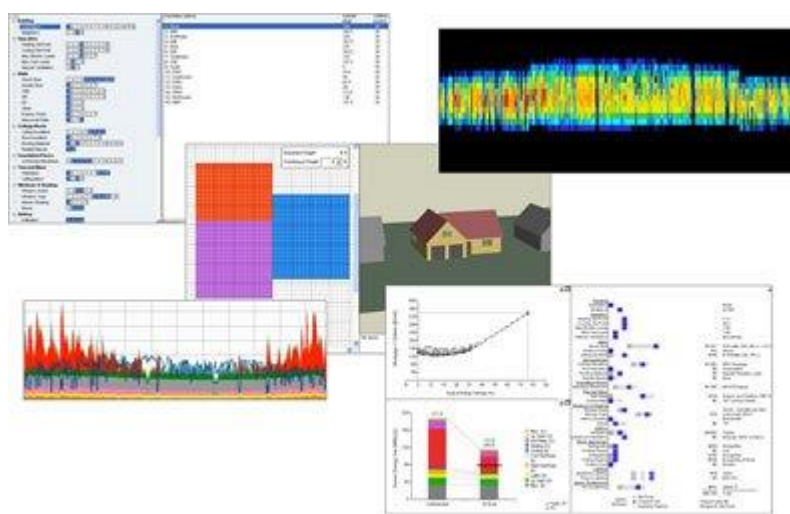


Figure 4.10 Différentes fenêtres du logiciel BEopt

Source : (energy.gov/eere/buildings/BEopt, 2023)

BEopt, en tant qu'outil sophistiqué, contribue de manière significative à l'optimisation des performances énergétiques des bâtiments, jouant ainsi un rôle crucial dans la transition vers des structures résidentielles plus durables et écoénergétiques.

8. Caractéristiques du modèle de simulation

Les données employées pour élaborer le modèle de simulation du bâtiment sont exhaustivement énumérées (Tableau 4.1). Ces données sont conformes aux recommandations spécifiées dans le Document Technique Réglementaire (DTR) C3.2/4, une référence largement reconnue et adoptée en Algérie sous l'égide du Ministère de l'Habitat et de l'Urbanisme. Cette norme (DTR C3.2/4) est réputée pour sa pertinence et son utilisation fréquente dans les domaines architecturaux locaux.

Les informations fournies englobent diverses propriétés, telles que l'épaisseur (en mètres), la conductivité thermique (λ) en $W\ m^{-1}\ K^{-1}$, la résistance thermique (R) en $m^2\ K\ W^{-1}$, ainsi que la valeur U (U) en $W\ m^{-2}\ K^{-1}$. Cet ensemble de données couvre les composants du bâtiment, notamment les murs extérieurs et intérieurs, les planchers, les toits et les fenêtres, présentant une variété de matériaux et de compositions. Ces valeurs, intrinsèquement cruciales pour évaluer les performances thermiques, enrichissent notre compréhension globale du comportement thermique de la structure simulée.

Tableau 4.1 Caractéristiques du modèle de simulation

Source : (Makhloufi & Louafi, 2022)

Composant	Matériaux	Épaisseurs (m)	Conductivité Thermique ($W/m \cdot K$)	Résistance Thermique ($m^2 \cdot K/W$)	Valeur U ($W/m^2 \cdot K$)
Mur extérieur	Plâtre	0,02	0,35	0,06	0,95
	Brique Creuse	0,1	0,48	0,21	
	Lame d'Air	0,05	0,11	0,45	
	Brique Creuse	0,15	0,48	0,31	
	Ciment	0,02	1,15	0,02	
Mur intérieur	Plâtre	0,02	0,35	0,06	3,10
	Brique Creuse	0,1	0,48	0,21	
	Plâtre	0,02	0,35	0,06	
Plancher	Carrelage	0,01	2,1	0,00	5,63
	Mortier	0,02	1,15	0,02	
	Dalle	0,2	1,45	0,14	
	Mortier	0,02	1,15	0,02	
Toit	Bitume	0,02	0,23	0,09	4,13
	Dalle	0,2	1,45	0,14	
	Mortier	0,02	1,15	0,02	
Fenêtres	Aluminium et verre	0,10	/	/	5,68

9. Paramètres d'occupation et de fonctionnement

Les programmes détaillés pour l'occupation et l'exploitation du bâtiment sont méthodiquement résumés (Tableau 4.2). Ce tableau offre une vue d'ensemble claire et organisée des divers schémas d'utilisation et d'opération prévus pour le bâtiment. Ces

schémas de programmation couvrent une gamme variée d'activités et de fonctions, déterminant ainsi la manière dont les espaces seront occupés et gérés à différents moments.

Tableau 4.2 Paramètres d'occupation et de fonctionnement

Source : (Auteur, 2022)

Paramètres	Valeurs
Densité d'occupation	15,0 m ² /personne
Équipements	15,0 W/m ²
Éclairage	8,6 W/m ²
Températures de Consigne de Chauffage	20 °C
Températures de Consigne de Refroidissement	28 °C
Débit d'Air Extérieur/Personne	8,1 L/s.personne
Infiltration	1,45 L/s-m
Heures d'exploitation	24h/24h
Programmes Journaliers	7 jours par semaine

10. Calibration et validation du modèle de simulation

Pour garantir l'exactitude des résultats et la validation de la simulation énergétique, les données issues de l'outil de simulation, englobant la consommation et la demande d'énergie, ont été rigoureusement comparées aux valeurs extraites de cinq années de factures d'énergie du bâtiment objet d'étude, mais aussi des divers mesure entreprise. Cette procédure de validation a été exécutée en stricte conformité avec les lignes directrices définies par la norme ASHRAE 14-2014 (ASHRAE, 2014), à cette fin, l'évaluation s'est appuyée à la fois sur l'erreur biais moyenne (Mean Bias Error - MBE) et le coefficient de variation de l'erreur quadratique moyenne(Coefficient of Variation of the root mean squared error value - CVRMSE) afin de quantifier le degré potentiel d'écart entre les données mesurées et les prédictions simulées.

La méthodologie de calibrage et de validation a été rigoureusement appliquée en utilisant les équations (4.6) et (4.8). Cette démarche méthodique a permis de vérifier la justesse des résultats de simulation en les mettant à l'épreuve de données empiriques issues de l'exploitation réelle du bâtiment. Cette validation croisée renforce la crédibilité des données simulées et confirme la robustesse de l'approche méthodologique adoptée.

$$MBE = \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{pred i} - Q_{data i})}{n Q_{data}} \quad (4.6)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum (Q_{pred i} - Q_{data i})^2}{n}} \quad (4.7)$$

$$CV(RMSE) = \frac{RMSE}{Q_{data}} = \frac{\sqrt{\frac{\sum(Q_{pred\ i} - Q_{data\ i})^2}{n}}}{Q_{data}} \quad (4.8)$$

Avec :

MBE : L'erreur biais moyenne

RMSE : Erreur quadratique moyenne

CV(RMSE) : Coefficient de variation de l'erreur quadratique moyenne

$Q_{pred\ i}$: Valeur prédite pendant la période i

$Q_{data\ i}$: Valeur mesurée pendant la période i

Q_{data} : Moyenne mesurée au cours de la période

Dans notre contexte spécifique, l'évaluation du MBE ainsi que du CV(RMSE) a été méthodiquement entreprise et les résultats résumés (Tableau 4.3).

Tableau 4.3 Calibration et validation du modèle de simulation

Source : (Auteur, 2022)

	MBE	(CV)RMSE
ASHRAE Guidelines. 14–2002	≤5%	≤15%
Valeur d'erreur du modèle	-0.16%	6%

Ces résultats quantitatifs soulignent la concordance entre les données simulées et les données empiriques mesurées, renforçant ainsi la fiabilité et la précision de la méthode de simulation employée.

Conclusion

Ce chapitre nous a permis de développer une méthodologie exhaustive et rigoureuse en matière d'optimisation des performances des bâtiments à énergie net zéro. Fondée sur les principes de la directive sur la performance énergétique des bâtiments (EPBD) appelé « Cost-Optimality », cette méthodologie a été systématiquement enrichie pour s'aligner davantage sur le contexte spécifique et les impératifs inhérents à notre étude. Cette adaptation a englobé des orientations génériques visant à orchestrer l'optimisation des coûts, depuis l'établissement du bâtiment de référence jusqu'à la sélection des mesures d'efficacité énergétique et le calcul exhaustif de la consommation d'énergie. Son aspect distinctif réside dans sa capacité à encapsuler de manière cohérente et simultanée divers paramètres, notamment la consommation d'énergie et les coûts du cycle de vie, au sein d'un processus d'optimisation multi-objectifs. Cette approche crée un cadre robuste pour la conception et la mise en œuvre de bâtiments NZE à haute performance, incrustant ainsi les considérations économiques au cœur de l'entreprise de conception. Une autre caractéristique distinctive est l'adoption d'une démarche en plusieurs étapes (multi-phasage). Cette approche nous a permis de rationaliser les ressources matérielles et temporelles requises pour les simulations en créant une transition graduelle de la conception préliminaire à la simulation exhaustive. La mise en évidence de la frontière de Pareto constitue une étape finale cruciale, apportant une orientation précieuse dans le choix éclairé des solutions optimales au sein du paysage complexe des résultats.

Dans son ensemble, elle se révèle être un outil précieux pour orchestrer avec diligence et ingéniosité la réalisation des objectifs de performance des NZE tout en tenant compte des considérations économiques et environnementales. Par la conjonction de paramètres multiples et d'approches sophistiquées d'optimisation, elle construit un pont solide entre les aspirations conceptuelles et leur matérialisation pratique, avec un accent évident sur la contribution à l'atténuation des effets du changement climatique.

**CHAPITRE -V- OPTIMISATION DES
PARAMETRES PASSIFS DU
BATIMENT**

Introduction

« La nature détient la clé de notre satisfaction esthétique, intellectuelle, cognitive, voire spirituelle »

— *Edward O. Wilson*

Les stratégies passives intégrées au processus de conception architecturale englobent un ensemble de techniques visant à concevoir un bâtiment à la fois confortable et hautement économe en énergie. Ces stratégies englobent différents aspects, allant de l'orientation de la structure à la configuration spatiale, en passant par la conception minutieuse des fenêtres et de leurs dimensions, ainsi que le choix éclairé des matériaux et la prise en compte rigoureuse des paramètres climatiques. De plus, elles intègrent une étude approfondie des données climatiques et géographiques, essentielle pour exploiter pleinement le potentiel inhérent à ces stratégies.

Ces méthodologies de conception mettent l'accent sur l'harmonie symbiotique entre l'environnement construit et le cadre naturel, en tirant parti des conditions ambiantes pour maximiser l'efficacité énergétique et le confort intérieur. Cette approche nécessite des considérations intégrées et une compréhension profonde des aspects climatiques et environnementaux locaux. En favorisant l'utilisation judicieuse des ressources naturelles disponibles, les stratégies passives incarnent une éthique de durabilité et de conscience écologique dans la conception architecturale.

Le premier chapitre de cette étude a consisté en une exploration minutieuse des connaissances existantes et des recherches préalables dans le domaine. Cette enquête approfondie s'est concentrée sur l'analyse des différentes approches des stratégies passives. Pour cela, nous avons soigneusement examiné les études précédentes afin de déterminer les méthodes les plus adaptées en fonction de nos considérations environnementales et contextuelles. Ce chapitre vise donc à présenter en détail les stratégies que nous avons choisies, en expliquant clairement leurs bases conceptuelles ainsi que les limites méthodiques que nous avons établies. De plus, nous allons exposer les résultats concrets issus des simulations énergétiques que nous avons menées. Cette démarche méthodique et bien structurée reflète notre engagement à apporter une contribution significative au domaine des stratégies passives dans la conception énergétique des bâtiments.

1. Les stratégies passives

Les stratégies passives inscrites dans la conception des bâtiments représentent des approches de conception qui visent à minimiser la consommation énergétique et à optimiser le confort au sein de la structure, ce, en recourant aux éléments naturels et sans le recours aux systèmes mécaniques actifs. Ces stratégies s'ancrent profondément dans le contexte environnemental du bâtiment, capitalisant sur les ressources naturelles intrinsèques du site, telles que l'énergie solaire, les flux d'air naturels, la ventilation, la lumière naturelle, etc.

1.1. Orientations

L'orientation d'un bâtiment désigne la direction dans laquelle la structure est positionnée. Cette orientation peut engendrer des répercussions substantielles sur l'efficacité énergétique, thermique, visuelle et d'autres facteurs connexes. De nombreuses études ont démontré que l'orientation appropriée peut contribuer de manière significative à la réduction de la consommation énergétique et peut également engendrer d'autres avantages liés à des considérations multidisciplinaires (Hikmat et al., 2020) (Missoum et al., 2014) (Szalay & Zöld, 2014) (Attia et al., 2012) (Morrissey et al., 2011) (Louafi et al., 2007) (Abanda & Byers, 2016).

Cependant, il convient de noter que l'orientation optimale peut varier en fonction de la localisation géographique, de l'environnement immédiat et des conditions climatiques propres à chaque site. Ainsi, nous avons adopté une approche systématique en sélectionnant plusieurs variantes d'orientation à évaluer, spécifiquement adaptées aux climats étudiés. L'étude expose avec clarté les 24 configurations d'orientation choisies pour être examinées au cours de nos simulations (Tableau 5.1). Cette démarche proactive reflète notre souci de tenir compte des paramètres régionaux et contextuels pour une analyse approfondie et précise des performances thermiques.

Tableau 5.1 Configurations d'orientation et leurs retours sur investissements

Source : (Auteur, 2022)

Variantes	Retour sur investissement (ans)
Sud	0
Sud +15	0
Sud +30	0
Sud +45	0
Sud +60	0
Sud +75	0
Ouest	0
Ouest +15	0
Ouest +30	0
Ouest +45	0
Ouest +60	0
Ouest +75	0
Nord	0
Nord +15	0
Cas d'étude (Nord +30)	0
Nord +45	0
Nord +60	0
Nord +75	0
Est	0
Est +15	0
Est +30	0
Est +45	0
Est +60	0
Est +75	0

L'étude de l'orientation en tant que stratégie pour atteindre la NZE offre une perspective éclairante sur l'impact de cette approche sur la demande énergétique de la structure. En se penchant sur le cas d'étude spécifique, avec une orientation Nord + 30°, les résultats révèlent des chiffres de consommation énergétique de 205.4 kWh/m²/an, 159.8 kWh/m²/an, et 286.0 kWh/m²/an respectivement pour les climats de Constantine, Alger et Ghardaïa.

Il est notable que la variation de cette orientation dans le climat de Constantine conduit à une économie d'énergie pouvant atteindre jusqu'à 3.5 %, soit une économie absolue de 7.3 kWh/m²/an (6157 kWh/an), tandis que l'orientation la moins favorable, à savoir 'Sud +75°',

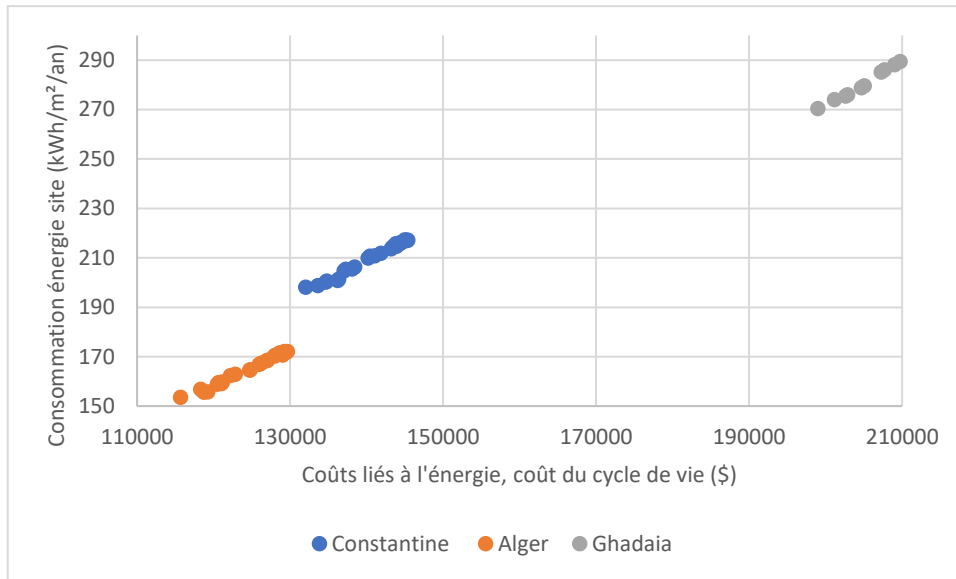


Figure 5.1 Effets des variations d'orientations sur l'optimalité de la consommation énergétique et du cout

Source : (Auteur, 2022)

se traduit par une perte de -5.8 %, équivalant à 12 kWh/m²/an (10170 kWh/an). Ainsi, une orientation appropriée dans le contexte climatique de Constantine peut générer une économie énergétique maximale de 9.3 %, représentant 19.3 kWh/m²/an (16327 kWh). Une analyse similaire appliquée au climat d'Alger confirme cette tendance d'optimisation, avec une réduction potentielle d'énergie de 3.9 % pour une orientation optimale (soit 6.3 kWh/m²/an ou 5310 kWh/an) et une perte de -7.7 % pour l'orientation la moins favorable (soit 12.2 kWh/m²/an ou 10383.5 kWh/an). Dans le climat de Ghardaïa, cette dynamique persiste, avec une potentialité de réduction de 5.5 % (15.6 kWh/m²/an ou 13265 kWh/an) pour l'orientation la plus favorable et une diminution de -8.6 % (24.5 kWh/m²/an ou 20785 kWh/an) pour l'orientation la plus défavorable (Figure 5.1).

Outre l'aspect énergétique, il est pertinent de noter que l'orientation exerce également une influence sur les coûts liés à l'énergie (ERC) du bâtiment. L'orientation optimale se traduit par des coûts considérablement réduits, offrant des économies de 13307 \$, 13545 \$ et 24480 \$ pour les climats de Constantine, Alger et Ghardaïa respectivement, en comparaison avec le scénario le moins favorable. À noter qu'un changement d'orientation n'entraîne pas de modification du coût initial de construction du bâtiment ni du coût total du cycle de vie.

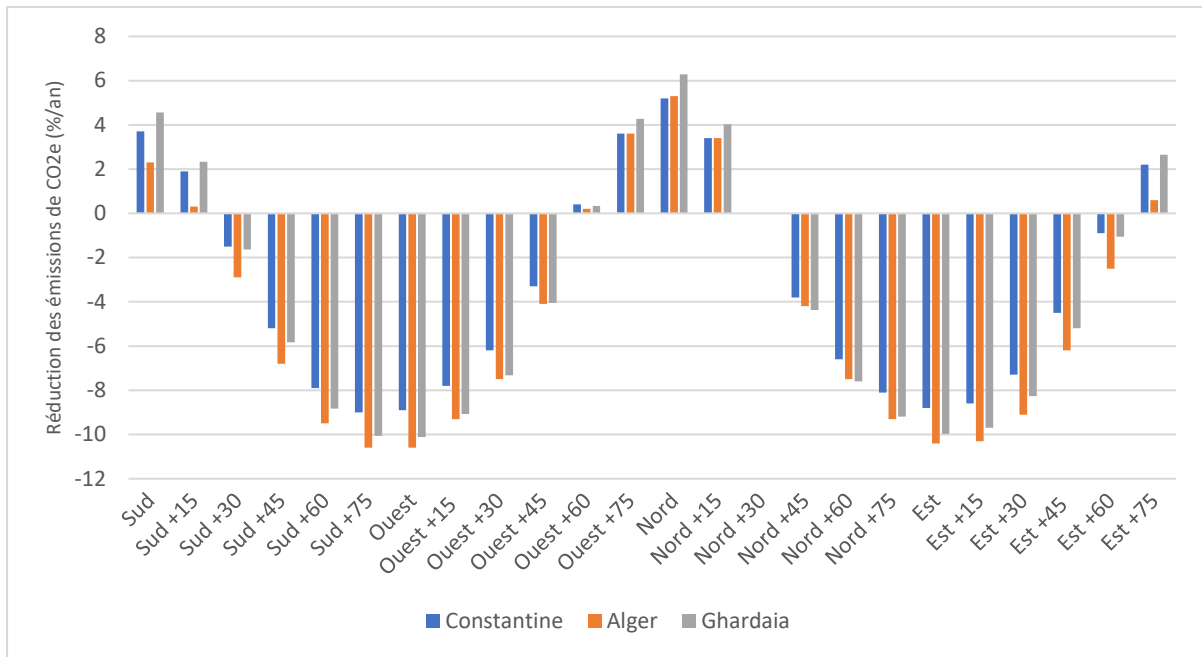


Figure 5.2 Effets des variations d'orientations sur les résultats des émissions de CO2e

Source : (Auteur, 2022)

Pour les résultats liés aux GES, les valeurs manifestent des variations, où les valeurs positives indiquent une diminution des émissions et les valeurs négatives témoignent d'une augmentation de ces taux. Il est à noter que ces résultats diffèrent en fonction du climat et de l'emplacement du projet, tout en suivant généralement une tendance similaire au sein des trois environnements climatiques considérés. Plus spécifiquement, l'orientation Nord affiche le taux de réduction le plus élevé, tandis que l'orientation Sud à +75° révèle le taux d'augmentation des émissions le plus défavorable. Il est à souligner que le climat de Ghardaïa se distingue par le potentiel le plus considérable en matière de réduction des émissions de gaz à effet de serre (GES), suivi par les climats de Constantine et Alger. Cette observation souligne la corrélation approximative entre les émissions de GES et les variations de la consommation énergétique. Cette relation étroite entre les émissions de GES et les niveaux de consommation énergétique confirme la pertinence des approches d'optimisation énergétique en tant qu'outils essentiels pour atténuer les impacts environnementaux, en particulier les émissions de GES (Figure 5.2).

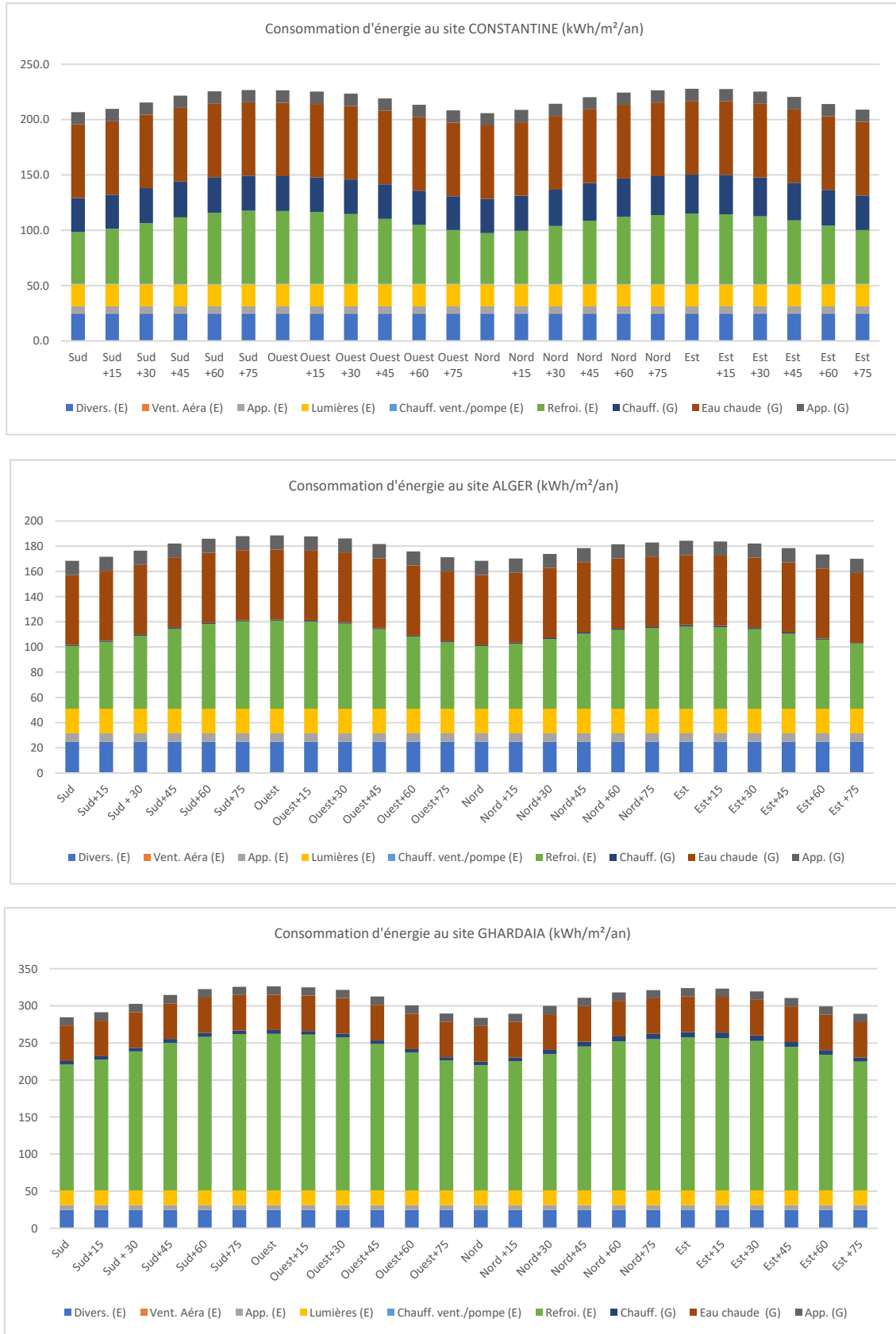


Figure 5.3 Effets des variations d'orientations sur les résultats de consommation finale d'énergie (Appartement 03)

Source : (Auteur, 2022)

Les résultats susmentionnés illustrent l'analyse de la consommation finale d'énergie d'un appartement spécifique (plus précisément, l'appartement numéro 03), dans le cadre de l'étude des différentes orientations (Figure 5.3).

Les données fournies par la simulation offrent une perspective approfondie de la consommation énergétique et des performances de cet appartement. Elles permettent d'acquérir une meilleure compréhension de l'efficacité des stratégies passives dans le contexte de l'atteinte de la NZE. L'examen des résultats dans différents climats met en évidence des variations dans la consommation énergétique selon les orientations. Notamment, l'orientation Nord s'avère être la plus efficiente en termes énergétiques par rapport à l'orientation de référence pour l'ensemble des climats.

Il est également observé que l'orientation impacte des éléments spécifiques tels que le refroidissement (Refroi. (E)) et le chauffage (Chauff. (G)), avec des valeurs variables en fonction du climat. Dans tous les climats, on constate une variation notable de la consommation liée au refroidissement, atteignant une réduction allant jusqu'à 20.1 kWh/m²/an, 18.55 kWh/m²/an et 42.15 kWh/m²/an par rapport à l'orientation la plus optimale dans les climats de Constantine, Alger et Ghardaïa respectivement. En ce qui concerne le chauffage, on remarque que les changements sont relativement minimes étant donné que la consommation de chauffage en elle-même est modérée, avec des taux de 4.5 kWh/m²/an pour la région de Constantine, 0.5 kWh/m²/an pour la région d'Alger et 3 kWh/m²/an pour la région de Ghardaïa.

1.2. Effet inter-bâtiments

L'effet inter-bâtiments peut être conceptualisé comme l'influence que les bâtiments environnants exercent sur l'étude de cas. Ce phénomène revêt une importance substantielle dans la qualification de l'usage et de la consommation énergétique du bâtiment en question. Il se manifeste principalement dans les environnements urbains denses où les bâtiments sont érigés à proximité les uns des autres. Les structures avoisinantes ont la capacité d'exercer une influence significative sur les performances énergétiques, ce qui rend impératif, pour une simulation énergétique cohérente, de prendre en considération l'environnement bâti environnant du bâtiment étudié (Yuan et al., 2017) (Pisello et al., 2012) (Wang et al., 2021).

Dans notre étude, nous avons entrepris d'évaluer différentes configurations environnementales en augmentant progressivement la distance entre les bâtiments (Tableau 5.2), par incréments de cinq mètres à chaque étape. L'objectif était d'appréhender l'impact de

ces variations sur la consommation énergétique et de déterminer la distance optimale pour une disposition spatiale optimale des bâtiments environnants.

Tableau 5.2 Variantes des distances entre bâtiments et leurs retours sur investissement.

Source : (Auteur, 2022)

Distances des autres bâtiments	Retour sur investissement (ans)
Aucun	0
Cas d'étude (distance réelle)	0
5m	0
10m	0
15m	0
20m	0

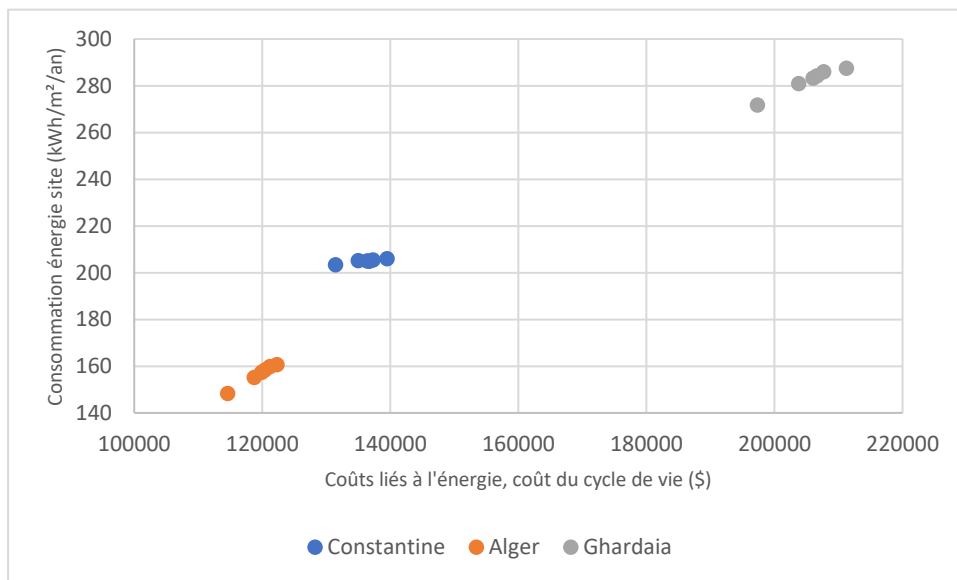


Figure 5.4 Effets des variations des distance sur l'optimalité de la consommation énergétique et du cout

Source : (Auteur, 2022)

Il est notable que le cas optimal est uniforme dans toutes les régions, avec une distance de 5 mètres. À cette distance, la consommation énergétique s'élève respectivement à 203,32 kWh/m²/an, 148,3 kWh/m²/an et 271,7 kWh/m²/an pour les climats de Constantine, Alger et Ghardaïa. Dans le contexte du climat de Constantine, la consommation énergétique demeure relativement stable malgré les différentes distances, affichant une légère fluctuation entre 205,9 kWh/m²/an et 203,3 kWh/m²/an pour le cas optimal. Ceci représente une différence de 2,6 kWh/m²/an en moyenne, soit environ 2230 kWh/an. Une telle réduction a un impact significatif sur le LCC et le ERC, avec une économie pouvant atteindre environ 8067 \$ dans le cas le plus défavorable. À Alger, il est à noter que la consommation énergétique du site

diminue à mesure que la distance diminue, avec une réduction de 12,3 kWh/m²/an, soit 10465 kWh/m²/an. En conséquence, des économies considérables au niveau du cout, soit environ 10465 \$, sont réalisées dans le cas le plus défavorable. En ce qui concerne Ghardaïa, les schémas de consommation énergétique reflètent des tendances similaires à celles d'Alger et Constantine, mais avec des taux légèrement plus élevés. Le changement de distance vers la distance optimale permet d'économiser 15,8 kWh/m²/an, soit 13480 kWh/an, et de réaliser des économies de LCC allant jusqu'à environ 13901 \$ avec le cas le plus défavorable (Figure 5.4).

En somme, les observations indiquent que les variations de distances entre les bâtiments ont un impact relativement mineur dans le climat de Constantine, mais gagnent en importance dans les climats d'Alger et Ghardaïa. Ces constatations mettent en évidence une tendance récurrente, suggérant qu'une composition urbaine plus compacte est susceptible de générer une consommation énergétique réduite.

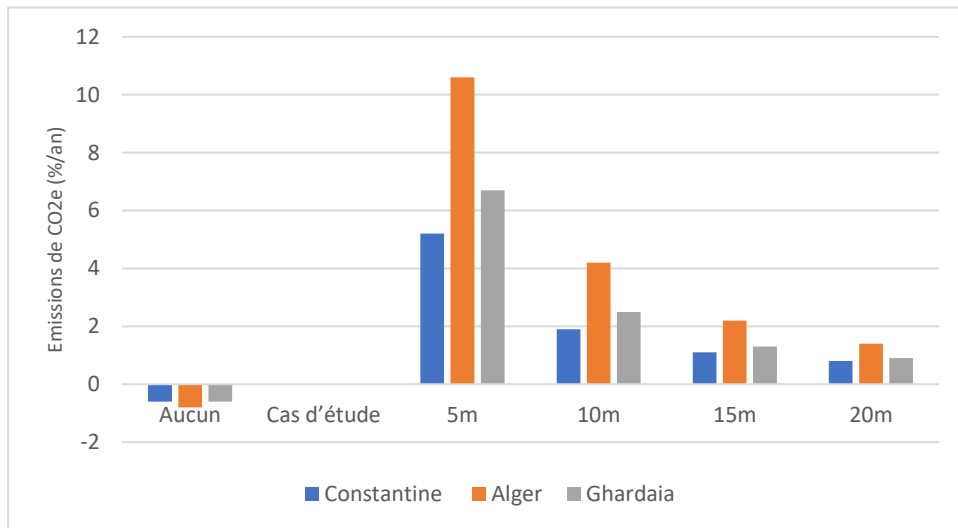


Figure 5.5 Effets des variations de distance sur les résultats des émissions de CO2e (%/an)

Source : (Auteur, 2022)

Les résultats des émissions de CO2e mettent en évidence des disparités entre chaque climat ainsi qu'avec chaque distance. Notamment, la distance de 5 mètres, considérée comme optimale dans tous les climats, se distingue. Cependant, il est important de noter que le climat d'Alger affiche les économies d'émissions de CO2e les plus significatives, atteignant 10,6 % par an. Il est suivi par la région de Ghardaïa avec une réduction de 6,7 % par an, puis par Constantine avec 5,2 %. Les résultats illustrent une logique cohérente avec celle observée pour la consommation énergétique. Les économies en matière d'émissions de CO2e sont directement liées à la densité et à la compacité du tissu urbain. En effet, les économies ont

tendance à croître lorsque le tissu urbain est plus dense et compact, indiquant un potentiel d'atténuation plus important dans de telles configurations (Figure 5.5).

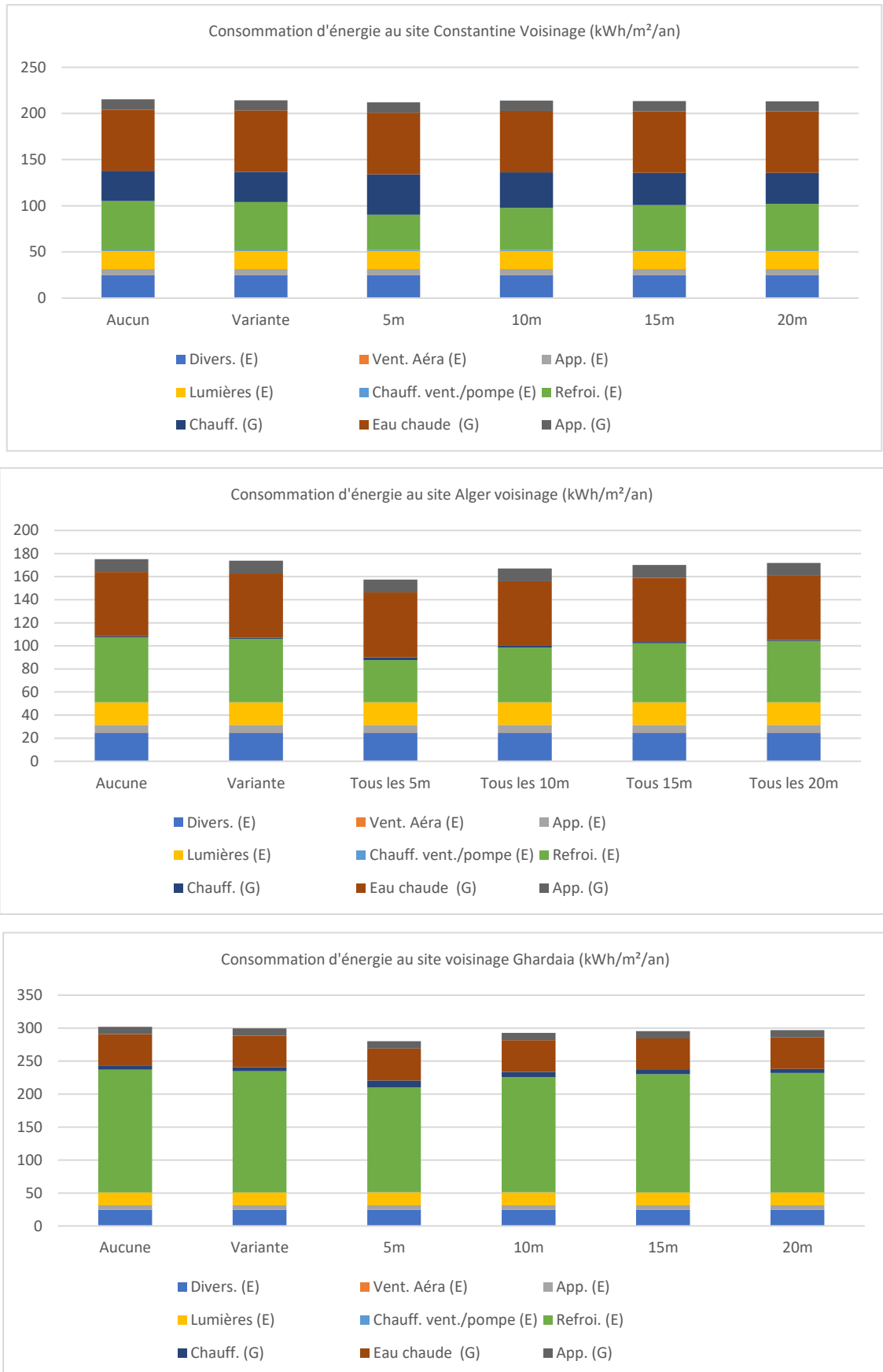


Figure 5.6 Effets des variations d'orientations sur les résultats de consommation finale d'énergie (Appartement 03)

Source : (Auteur, 2022)

Le résultat suivant présente une perspective plus spécifique sur la consommation finale du site, se focalisant sur l'appartement à l'étude dans différents contextes climatiques (Figure 5.6). À travers les diverses catégories, les résultats mettent en évidence des variations dans la consommation énergétique de l'appartement en fonction de la distance entre le bâtiment en question et les bâtiments environnants. Cependant, il est important de noter que ces variations restent minimales et ne varient pas significativement entre les différents scénarios.

En analysant les catégories spécifiques, il est possible de discerner une stabilité et une cohérence dans la consommation énergétique pour la plupart des catégories, à l'exception notamment des catégories de chauffage et de refroidissement. Dans le cas du climat de Constantine, une économie totale de 3,5 kWh/m²/an peut être réalisée entre le cas le plus optimal et le cas le plus défavorable, ce qui équivaut à environ 1,5 % de la consommation totale. À Alger, les résultats révèlent une économie substantielle dans la consommation énergétique liée au refroidissement, atteignant jusqu'à 14,5 kWh/m²/an, soit près de 10 % de la consommation totale de l'appartement. En ce qui concerne Ghardaïa, une économie totale de 16,7 kWh/m²/an a été obtenue, représentant environ 7 % de la consommation totale.

En somme, les résultats indiquent de manière générale que la consommation énergétique totale des appartements diminue à mesure que la distance entre les bâtiments diminue, offrant ainsi des économies d'énergie pouvant atteindre jusqu'à 10 % de la consommation énergétique totale du site.

1.3. Valeur U

Dans le domaine du bâtiment, les valeurs U des différentes composantes du bâtiment, telles que les murs, les fenêtres et les dalles, représentent une notion fondamentale. Elles mesurent l'énergie perdue à travers un mètre carré de matériau pour chaque différence de température entre l'intérieur et l'environnement extérieur. Plus la valeur U est basse, meilleure elle est, car elle indique que moins d'énergie est nécessaire pour maintenir le confort à l'intérieur des bâtiments. Les valeurs U des composants reflètent la capacité des matériaux à agir en tant qu'isolants pour contrôler les pertes d'énergie. Ces matériaux peuvent être un composant unique, comme le bois, ou un composite de matériaux, telle que la variété de compositions de murs en briques. Un calcul précis des valeurs U joue un rôle essentiel dans la prédiction de la consommation énergétique dans les simulations (Chung, 2018) (Giama, 2016).

1.3.1. Les assemblages de mur

Les divers assemblages de murs peuvent exercer une influence significative sur la consommation énergétique des bâtiments. Différents types d'assemblages de murs présentent des niveaux variables d'efficacité énergétique (Tableau 5.3). Les nouvelles configurations d'assemblages de murs visent à réduire la consommation d'énergie du bâtiment tout en améliorant le confort intérieur, Plusieurs études ont été menées afin de démontrer que les différents assemblages de murs peuvent contribuer de manière significative à la réduction drastique de la consommation énergétique (Hikmat et al., 2020) (Harkouss, 2018) (Missoum et al., 2014) (Szalay & Zöld, 2014) (Marszal & Heiselberg, 2011) (Leckner & Zmeureanu, 2011).

Tableau 5.3 Variantes des types de murs et leurs retours sur investissement.

Source : (Auteur, 2022)

	Retour sur investissement (ans)		
	Constantine	Alger	Ghardaïa
Brique 10, Air 5, Brique 15	0.0	0.0	0.0
Brique 10, polyuréthane 5, Brique 15,	75.5	/	45.4
Brique 10, Brique 15, polystyrène 2	9.6	/	3.8
Brique 10, Brique 15, polystyrène 4	10.7	/	4.6
Brique 10, Brique 15, polystyrène 8	14.0	/	6.7
Brique 10, Brique 15, polystyrène 10	15.7	/	7.8
Brique 10, Brique 15, liège 2	22.2	/	11.8
Brique 10, Brique 15, Laine de roche	19.5	/	10.1
Brique 10, Brique 15, Laine de verre	20.3	/	10.6
2 EPS, 20 Béton, 2 EPS (ICF)	/	/	9.9
4 EPS, 20 Béton, 4 EPS (ICF)	/	/	17.3
2 EPS, 30 Béton, 2 EPS (ICF)	/	/	18.3
4 EPS, 30 Béton, 4 EPS (ICF)	/	/	21.1
15 EPS CORE, Plâtre int (SIP)	/	/	2.9
20 EPS CORE, Plâtre int (SIP)	/	/	10.0
30 EPS CORE, Plâtre int (SIP)	/	/	24.4
15 EPS CORE, Béton int (SIP)	103.8	/	2.1
20 CORE EPS, Béton int (SIP)	160.6	/	7.5
30 CORE EPS, Béton int (SIP)	266.1	/	18.2
Brique 10, Brique 15, liège 4	25.7	/	14.4

Les résultats suivants présentent les diverses valeurs relatives à l'impact des différents matériaux de construction des murs sur la consommation énergétique du site, ainsi que sur les indicateurs de coûts ERC et LCC, dans trois climats distincts en Algérie. Cette analyse

approfondie offre une meilleure compréhension d'une des principales stratégies pour atteindre le concept de la NZE dans le bâtiment (Figure 5.7).

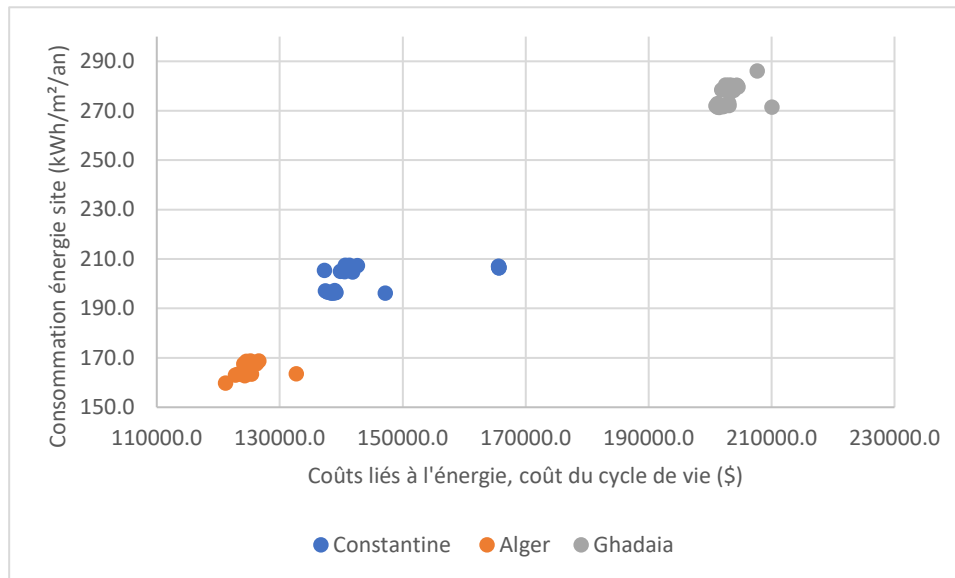


Figure 5.7 Effets des variations de mur sur l'optimalité de la consommation énergétique et du cout

Source : (Auteur, 2022)

Les résultats obtenus mettent en lumière l'importance majeure du choix des matériaux de construction des murs, non seulement sur les aspects énergétiques tels que le ERC, le LCC et la consommation énergétique du site, mais aussi sur le plan économique à long terme. Il s'avère essentiel d'examiner l'aspect économique des matériaux sur la durée afin de faire des choix judicieux adaptés à chaque contexte climatique. Pour le climat de Constantine, il est observé que la combinaison optimale pour réduire les variables consiste à utiliser un mur simple avec deux types de briques d'épaisseurs de 10 et 15 cm, complétées par une couche isolante en polystyrène de 4 cm d'épaisseur. Cette configuration peut générer des économies énergétiques atteignant 11 kWh/m²/an, soit l'équivalent de 9350 kWh/an, ainsi qu'une réduction de 2874 \$ en termes de ERC et LCC. Quant au climat d'Alger, la combinaison optimale diffère. En effet, la configuration standard de construction utilisée couramment en Algérie, comprenant des briques de 10 et 15 cm avec une lame d'air de 5 cm, s'avère la plus efficace dans ce contexte. Aucune autre variante ne présente un avantage significatif. Enfin, pour le climat de Ghardaïa, la configuration optimale consiste à utiliser des briques de 10 et 15 cm associées à une couche d'isolant en polystyrène de 10 cm. Cette composition offre des économies énergétiques substantielles de près de 14,7 kWh/m²/an, soit l'équivalent de 12495 kWh/an, et induit une économie considérable de 6226 \$ en termes de ERC et LCC.

En conclusion, cette étude met en exergue l'importance cruciale du choix éclairé des matériaux de construction dès les premières phases de conception pour parvenir à la réalisation de la NZE dans le bâtiment.

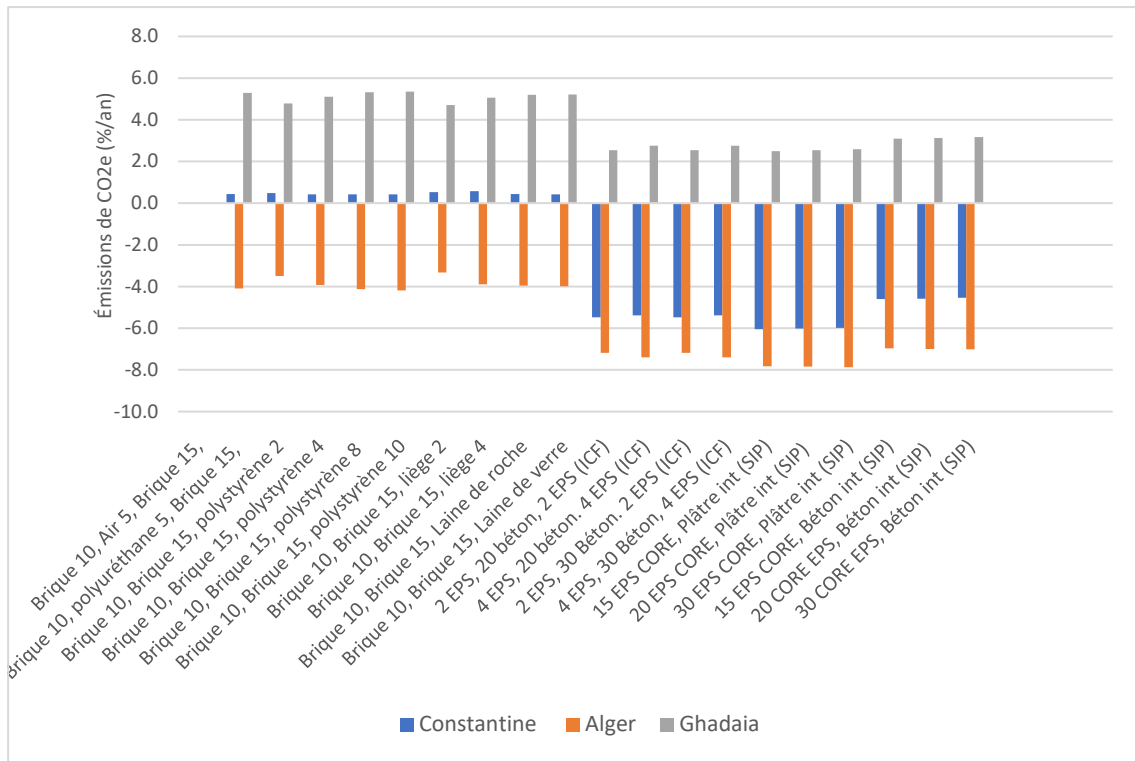


Figure 5.8 Effets des variations des murs sur les résultats des émissions de CO2e (%/an)

Source : (Auteur, 2022)

Les résultats suivants présentent des données essentielles relatives aux économies d'émissions de CO2 équivalent (CO2e) associées aux différents types de murs étudiés dans les trois climats distincts. Ces résultats contribuent de manière significative à notre compréhension de l'impact de ces variantes sur les émissions de CO2e dans leurs contextes climatiques spécifiques (Figure 5.8). L'analyse approfondie de ces données nous permet d'affirmer qu'il existe des variations notables des émissions résultant des variations des matériaux de construction pour chaque type de mur, et que cette variation varie également d'un climat à un autre. Les combinaisons de matériaux de base avec des matériaux isolants tels que le polystyrène, le polyuréthane et le liège manifestent des réductions variables des émissions dans les différents climats. Par exemple, l'utilisation du polystyrène conduit à une réduction des émissions de 5,4 % et 0,4 % par an dans les climats de Ghadaïa et de Constantine, respectivement, soulignant sa pertinence pour ces deux climats. En revanche, pour Alger, ce même matériau montre une réduction négative des émissions, atteignant -4,1

% par an, indiquant qu'il accroît les émissions de CO₂e par rapport au mur standard du cas d'étude.

Les résultats révèlent également que, dans la majorité des cas, les types de murs en ICF (béton coffrant isolant) ou SIP (panneaux isolants structurels) ne sont pas adaptés au climat

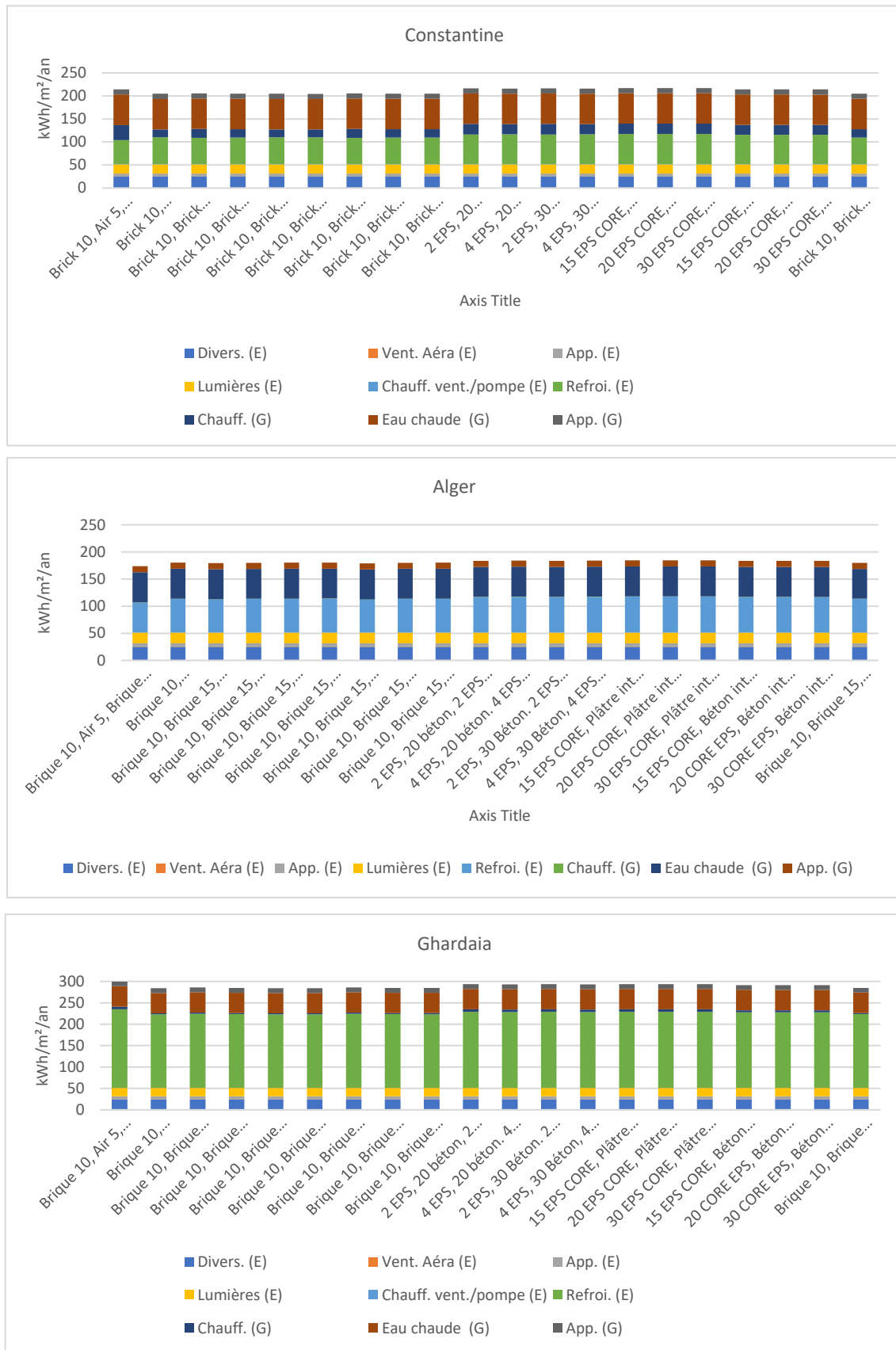


Figure 5.9 Effets des variations des murs sur les résultats de consommation finale d'énergie (Appartement 03)

Source : (Auteur, 2022)

nord-algérien. Cependant, le climat de Ghardaïa semble pouvoir bénéficier de ces méthodes

de construction alternatives. Cette conclusion souligne l'importance cruciale du choix judicieux des matériaux de construction en fonction du climat local lors de la conception et de la construction des bâtiments.

Les résultats suivants présentent la consommation finale d'énergie sur le site de l'appartement étudié en fonction de différentes combinaisons de murs. L'analyse des diverses catégories de ces données révèle des variations de consommation en fonction du type de mur et des climats, ce qui nous permet de mieux appréhender les distinctions entre les différents cas examinés (Figure 5.9).

Les différentes catégories, telles que Vent. Aéra, App, Lumières Chauff. vent. et app., montrent leur stabilité à travers les différents types de murs, suggérant que ces catégories ne sont pas directement impactées par le changement de cette stratégie. D'autre part, nous pouvons observer que dans certaines catégories telles que le chauffage et le refroidissement, la consommation énergétique varie d'un cas à l'autre, suggérant une relation ou une influence entre ces catégories et les changements de matériaux.

Pour les climats de Constantine et Ghardaïa, le changement le plus significatif est attribuable à l'utilisation du polystyrène comme isolant. Cette utilisation permet des économies substantielles en matière de refroidissement et de chauffage, pouvant atteindre 12,5 kWh/m²/an soit 10625 kWh/an pour le climat de Constantine et 14,7 kWh/m²/an soit 12495 kWh/an pour le climat de Ghardaïa. En revanche, pour le climat d'Alger, la même tendance est observée en ce qui concerne les changements de refroidissement et de chauffage, mais avec des taux et des matériaux différents. Pour ce climat, la combinaison la plus optimale est constituée des matériaux standards sans isolation, ce qui engendre une économie par rapport au cas le moins favorable de 8,86 kWh/m²/an soit 7531 kWh/an.

L'analyse de ces données confirme avec certitude que les matériaux de construction et les types de murs ont un impact non seulement sur la consommation énergétique, mais également sur les émissions de CO₂e et les coûts. Par conséquent, tout acte de construction ou de conception doit nécessairement prendre en compte le climat comme l'un des éléments fondamentaux du design en vue d'atteindre une efficacité énergétique accrue.

1.3.2. Les assemblages de dalle

Les dalles sont des éléments structurels essentiels à la construction des bâtiments (Tableau 5.4). Il est pertinent d'explorer la relation entre les assemblages de dalle et la consommation énergétique du bâtiment, étant donné que la conception et la mise en œuvre des dalles peuvent influencer de manière significative l'efficacité énergétique du bâtiment.

Certaines configurations spécifiques d'assemblages de dalle peuvent contribuer à la réduction substantielle de la consommation énergétique tout en améliorant l'efficacité énergétique globale du bâtiment (Harkouss, 2018) (Sun et al., 2018) (Szalay & Zöld, 2014) (Taherahmadi et al., 2021) (Krarti & Ihm, 2016) (Cao et al., 2016).

Tableau 5.4 Variantes des dalles et leurs retours sur investissement.

Source : (Auteur, 2022)

	Retour sur investissement (ans)		
	Constantine	Alger	Ghardaïa
Dalle Entrevous Simple	0.0	0.0	0.0
Dalle en béton 20	2079.8	1727.3	575.8
Dalle en béton 30	6178.1	8764.2	4710.7
Dalle en béton 15	0.0	0.0	0.0
Dalle Entrevous polystyrène	1327.0	1553.6	530.8
Dalle Entrevous terre cuite	/	31912.9	1061.6

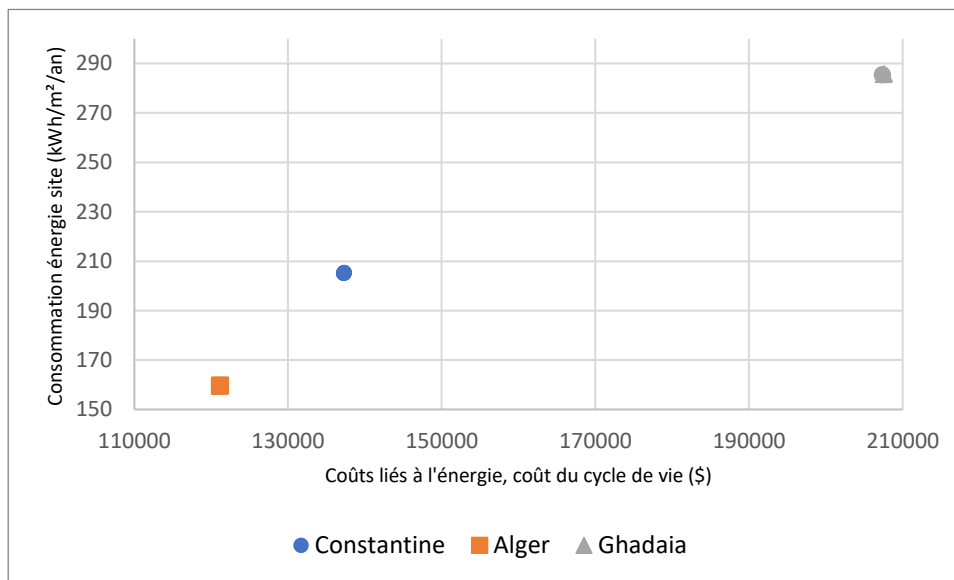


Figure 5.10 Effets des variations de dalle sur l'optimalité de la consommation énergétique et du cout.

Source : (Auteur, 2022)

Les résultats illustrés offrent une perspective exhaustive sur la consommation énergétique ainsi que sur le ERC, LCC pour différents types de dalles dans trois climats distincts. Ce graphique permet une analyse approfondie des implications du changement de type de dalle sur les performances énergétiques du bâtiment, non seulement en raison de la variation des matériaux utilisés, mais aussi du fait de l'épaisseur modifiée (Figure 5.10).

Les résultats indiquent que, dans les différents climats étudiés et avec les divers matériaux employés, il existe un degré de performance limité et que les variantes ne diffèrent

que légèrement du cas d'étude, avec des écarts maximums de 0.24 kWh/m²/an pour Constantine, 0.15 kWh/m²/an pour Alger et 0.6 kWh/m²/an pour Ghardaïa. Par conséquent, le choix de l'optimalité doit être guidé par les coûts associés aux différents matériaux, dans cette optique, la dalle en béton de 15 cm peut être considérée comme le choix le plus économique.

Les résultats présentent des données concernant les économies d'émissions de CO₂ équivalent (CO₂e) pour les différents types de dalles étudiés dans les trois climats distincts (Figure 5.11). Ces résultats contribuent à la compréhension de l'impact que ces variations ont sur les émissions de CO₂e dans leurs contextes climatiques spécifiques.

Tout comme pour la consommation énergétique, il est observé que la réduction des émissions de CO₂e due au changement de type de dalle et dans les différents climats ne dépasse pas 0.3%. Par conséquent, ces variations peuvent être considérées comme négligeables.

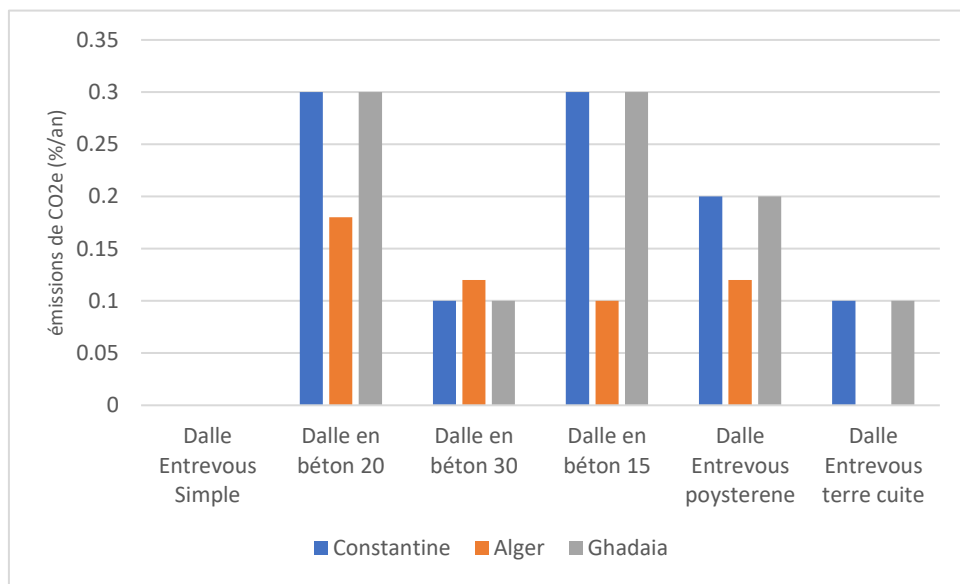


Figure 5.11 Effets des variations de dalles sur les résultats des émissions de CO₂e (%/an)

Source : (Auteur, 2022)

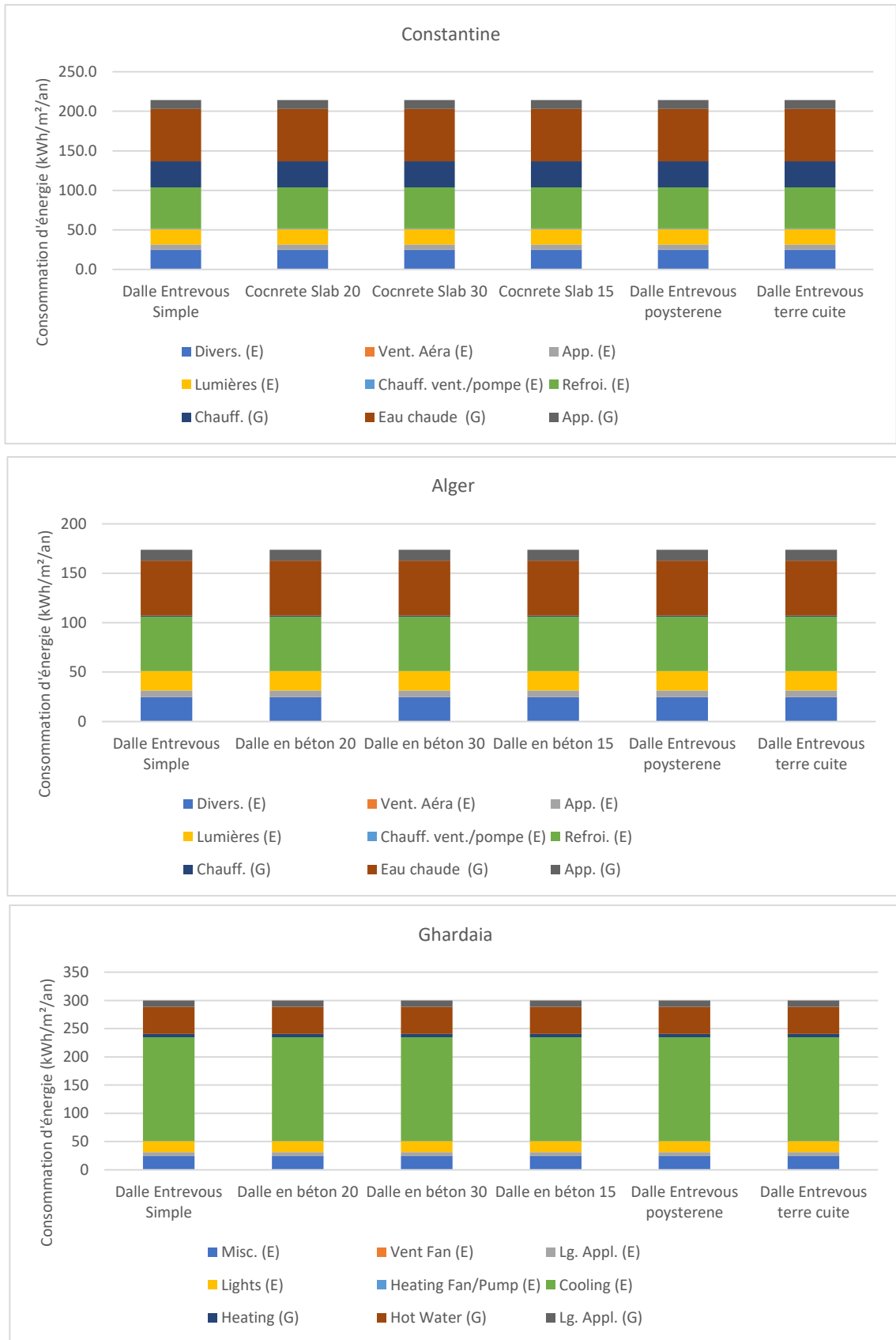


Figure 5.12 Effets des variations d'orientations sur les résultats de consommation finale d'énergie (Appartement 03)

Source : (Auteur, 2022)

Les résultats présentent une vue d'ensemble de la consommation énergétique finale du site pour différents types de dalles, dans trois contextes climatiques distincts. Une analyse approfondie de ces données permet d'évaluer la performance énergétique propre à chaque type de dalle, ainsi que leur potentiel d'incidence sur la gestion de l'efficacité énergétique du bâtiment (Figure 5.12).

L'examen attentif des variations dans la consommation énergétique finale met en évidence que les différents types de dalles ont un impact minimal sur les besoins en chauffage et en refroidissement. Cette constatation nous amène à conclure que les variantes choisies, largement prévalentes dans les diverses typologies de construction en Algérie, n'apportent pas de contribution substantielle aux économies d'énergie dans le cadre des climats examinés.

Il serait opportun d'envisager des améliorations complémentaires pour la conception des dalles. Une première initiative pourrait consister à intégrer des isolants dans les plafonds, suivie par l'incorporation d'isolants pour les sols, dans le but d'évaluer leurs contributions à l'amélioration des performances de ces types de dalles.

1.3.3. Isolation des dalles

L'efficacité énergétique et la performance thermique des bâtiments sont grandement influencées par le choix approprié de matériaux isolants. Les isolants répertoriés englobent une variété de solutions, allant des matériaux traditionnels aux options plus innovantes. Chaque isolant possède des propriétés spécifiques qui peuvent impacter la capacité à réduire les pertes thermiques à travers le sol, contribuant ainsi à l'optimisation de la consommation énergétique globale des bâtiments (Tableau 5.5).

Tableau 5.5 Variantes des isolations de dalles et leurs retours sur investissement.

Source : (Auteur, 2022)

	Retour sur investissement (ans)		
	Constantine	Alger	Ghardaïa
Aucun	0	0	0
Polyuréthane	/	/	/
Polystyrène 2 cm	/	/	/
Polystyrène 4 cm	/	/	/
Polystyrène 8 cm	/	/	/
Polystyrène 10 cm	/	/	/
Liège 2	441.256	1241.49	385.5
Liège 4	662.786	1692.77	642.4
Laine de roche	/	/	/
Laine de verre	/	/	/

Les résultats illustrent l'impact de divers types d'isolation des sols sur la consommation énergétique du site, dans trois climats distincts. Ils mettent en évidence des variations

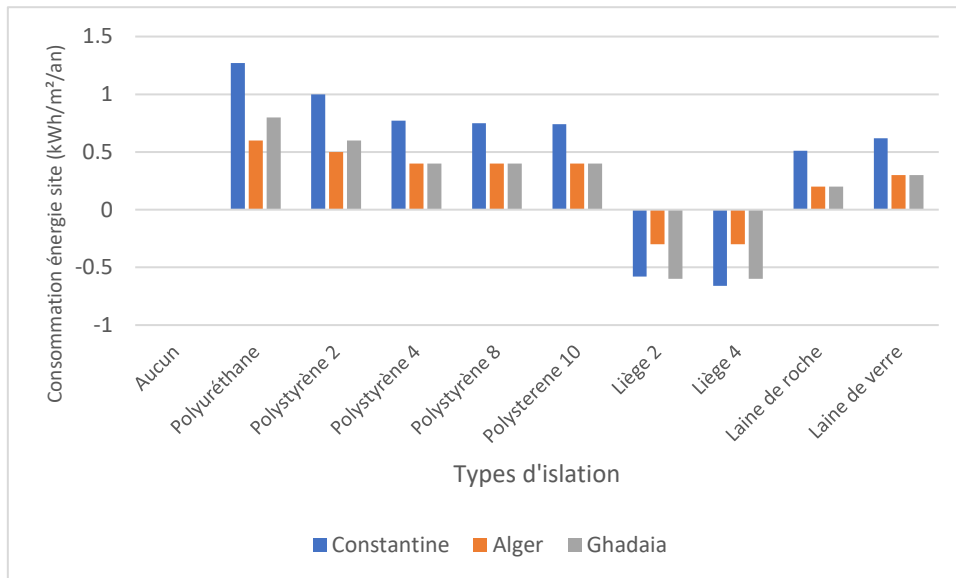


Figure 5.13 Economie sur la consommation énergie site pour l'isolation de la dalle (sol) (kWh/m²/an)

Source : (Auteur, 2022)

minimes en termes d'économies de consommation énergétique résultant des différents matériaux d'isolation des sols. Cette observation suggère que les effets de l'isolation des sols sur l'efficacité énergétique ne sont pas significatifs dans ce contexte, et que les avantages d'investissement sont très limités (Figure 5.13).

Dans l'ensemble des régions étudiées, les écarts de consommation énergétique du site engendrés par l'utilisation de différents matériaux d'isolation n'excèdent pas 1.3 kWh/m²/an, équivalant à 1105 kWh/an. Les périodes de retour sur investissement pour ces mesures d'isolation atteignent jusqu'à 1241 ans au maximum, ce qui indique que ce type d'isolation n'est pas optimal dans le cadre de cette étude (Tableau 5.5).

Il existe plusieurs isolants potentiels qui peuvent être appliqués pour l'isolation des plafonds (Tableau 5.7).

Tableau 5.6 Compilation des isolants potentiels qui peuvent être appliqués pour l'isolation des plafonds

Source : (Auteur, 2022)

	Retour sur investissement (ans)		
	Constantine	Alger	Ghardaïa
Aucun	0.0	0	0.0
Polyuréthane	71.4	/	103.9
Polystyrène 2 cm	2.1	/	2.9

Polystyrène 4 cm	4.0	/	5.7
Polystyrène 8 cm	8.1	/	11.7
Polystyrène 10 cm	10.1	/	14.5
Liège 2	17.1	/	23.2
Liège 4	29.5	/	41.3
Laine de roche	18.6	/	26.3
Laine de verre	20.0	/	28.3

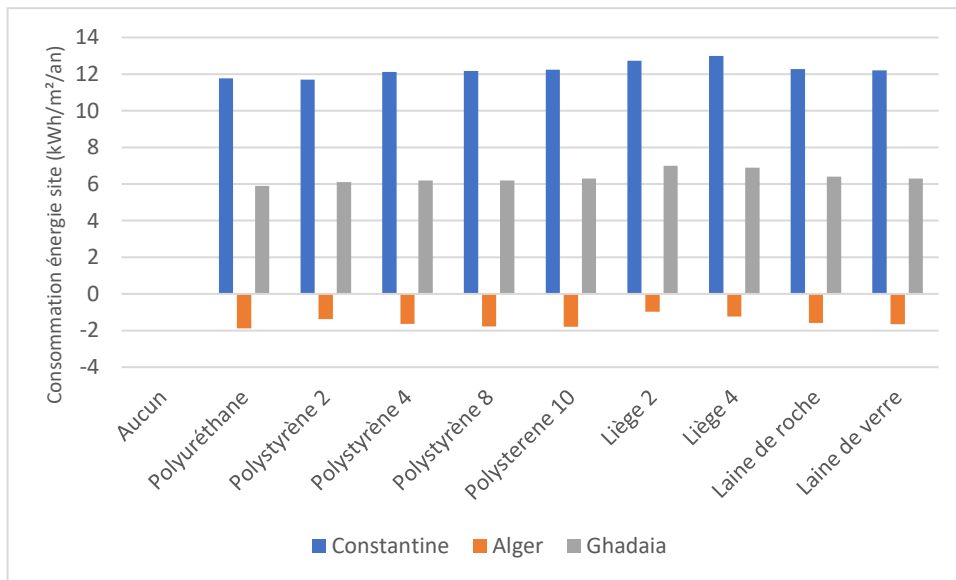


Figure 5.14 Economie sur la consommation énergie site pour l'isolation de la dalle (plafond)

Source : (Auteur, 2022)

Les résultats illustrent l'impact du changement de matériaux d'isolation des dalles sur les économies d'énergie finales du site, dans les différents climats étudiés (Figure 5.14).

À Constantine, toutes les isolations présentent des économies d'énergie par rapport à la dalle non isolée. L'isolation au liège de 4 cm affiche la plus grande économie, avec 13 kWh/m²/an, suivi de près par l'isolation au liège de 2 cm avec 12.73 kWh/m²/an. Les autres matériaux d'isolation montrent également des économies d'énergie, variant de 11.69 à 12.28 kWh/m²/an. Ces résultats soulignent que les divers matériaux d'isolation ont un effet positif sur la consommation énergétique du bâtiment. À Alger, tous les matériaux d'isolation donnent des valeurs négatives, indiquant que la meilleure option est d'utiliser une dalle sans isolant. Cependant, il est important de noter que ces valeurs sont faibles, se situant entre -0.97 et -1.88 kWh/m²/an. Ces résultats suggèrent que l'économie d'énergie réalisée par ces matériaux est insignifiante et qu'ils n'ont pas d'impact notable sur l'amélioration de la consommation énergétique.

De manière similaire à Constantine, les matériaux d'isolation offrent des économies d'énergie à Ghardaïa, variant de 5.9 à 7 kWh/m²/an. Cependant, ces résultats sont environ la moitié de ceux obtenus à Constantine.

En résumé, les résultats soulignent l'importance du choix judicieux des matériaux d'isolation et de leur emplacement, non seulement en termes d'économie d'énergie, mais également sur le plan économique. Ils mettent également en évidence que l'effet de l'isolation peut varier selon la région. Par exemple, des résultats positifs ont été observés pour Constantine et Ghardaïa, tandis qu'à Alger, les résultats étaient négatifs.

1.4. Type de fenêtre

Les fenêtres sont des ouvertures dans le bâtiment qui sont souvent construites dans un mur, permettant ainsi l'introduction de la lumière naturelle et offrant une vue sur l'extérieur, tout en favorisant la ventilation. Il existe une variété de types de fenêtres dans le domaine de la construction, et la sélection de ces fenêtres dépend de différents critères. Les caractéristiques des fenêtres peuvent avoir un impact significatif sur l'efficacité énergétique du bâtiment. Parmi les facteurs à considérer, on peut citer les matériaux utilisés pour les cadres, les propriétés du vitrage telles que la transmission thermique et les caractéristiques du verre, le type d'ouverture, ainsi que la présence de gaz et de vides. Plusieurs études ont été menées et ont démontré que les différents types de fenêtres peuvent jouer un rôle majeur dans l'amélioration de l'efficacité énergétique des bâtiments. Des éléments tels que les matériaux de cadre, les propriétés du vitrage, le type d'ouverture et l'utilisation de gaz isolants peuvent tous contribuer à réduire les pertes d'énergie thermique, à améliorer l'isolation et à diminuer la demande en chauffage et en climatisation (Hikmat et al., 2020) (Sun et al., 2018) (Szalay & Zöld, 2014) (Li et al., 2013) (Oh et al., 2017). Il existe différents types de fenêtres locale qui peuvent être utilisés dans notre cas (Makhloufi & Louafi, 2022) (Tableau 5.7).

Tableau 5.7 Variantes des isolations de dalles et leurs retours sur investissement.

Source : (Makhloufi & Louafi, 2022)

	Retour sur investissement (ans)		
	Constantine	Alger	Ghardaïa
Simple, transparent, métal	0.00	0	0.0
Simple, Stopsol, Métal	5.21	2.6	1.6
Simple, transparent, métal, rupture thermique	7946.02	2837.5	763.9
Simple, Stopsol, Métal, Rupture thermique	23.96	15.2	8.6
Double, transparent, métal, air	2.85	2.5	1.2
Double, Stopsol, Métal, Air	2.80	3.2	1.4

Double, transparent, métal, air, rupture thermique	23.44	23.8	11.2
Double, Stopsol, Métal, Air, Rupture thermique	15.26	20	8.1
Double, transparent, métal, arg	4.20	3.2	1.7
Double, Stopsol, Métal, Arg	3.86	4	1.8
Double, transparent, métal, Arg, rupture thermique	20.33	18	8.9
Double, Stopsol, Métal, Arg, Rupture thermique	15.42	18.4	7.7

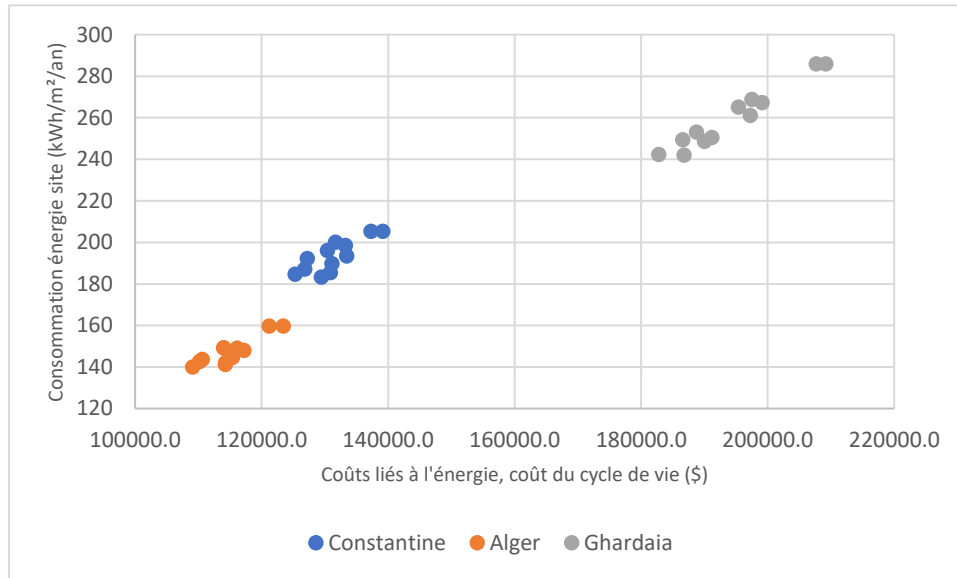


Figure 5.15 Effets des variations des types de fenêtres sur l'optimalité de la consommation énergétique et du cout

Source : (Auteur, 2022)

Les résultats présentent une analyse de l'impact du changement de types de fenêtres sur la consommation énergétique du site ainsi que sur LCC et le ERC dans les climats étudiés (Figure 5.15).

En ce qui concerne la consommation énergétique, les résultats mettent en évidence des variations significatives en fonction du type de fenêtre utilisé dans les trois climats étudiés. Les fenêtres à double vitrage, avec revêtement solaire, cadre en métal et remplissage de gaz d'argon se démarquent comme les options présentant la plus faible consommation énergétique. Ces variantes permettent des économies énergétiques de 22.1, 19.8 et 44 kWh/m²/an pour les climats de Constantine, Alger et Ghardaïa respectivement. En revanche, les fenêtres à simple vitrage présentent la consommation énergétique la plus élevée.

Lorsqu'on prend en compte non seulement le coût initial des fenêtres, mais aussi les ERC ; LCC, les résultats diffèrent. Les types de fenêtres avec la consommation énergétique la plus faible se révèlent également les plus économiques sur le long terme, générant des économies considérables en termes de coûts. Par exemple, ces fenêtres peuvent permettre des économies de 12020, 12050 et 24891.5 \$ respectivement pour les climats de Constantine,

Alger et Ghardaïa. Ces résultats soulignent l'importance de considérer les coûts globaux et à long terme lors du choix des types de fenêtres.

Dans l'ensemble, ces résultats démontrent que le choix judicieux des types de fenêtres en fonction des climats peut contribuer à améliorer l'efficacité énergétique et à réduire la consommation énergétique des bâtiments. Les types de fenêtres avec double vitrage, revêtement solaire, cadre en métal et remplissage de gaz d'isolation se distinguent comme ayant un fort potentiel pour améliorer la performance énergétique des bâtiments.

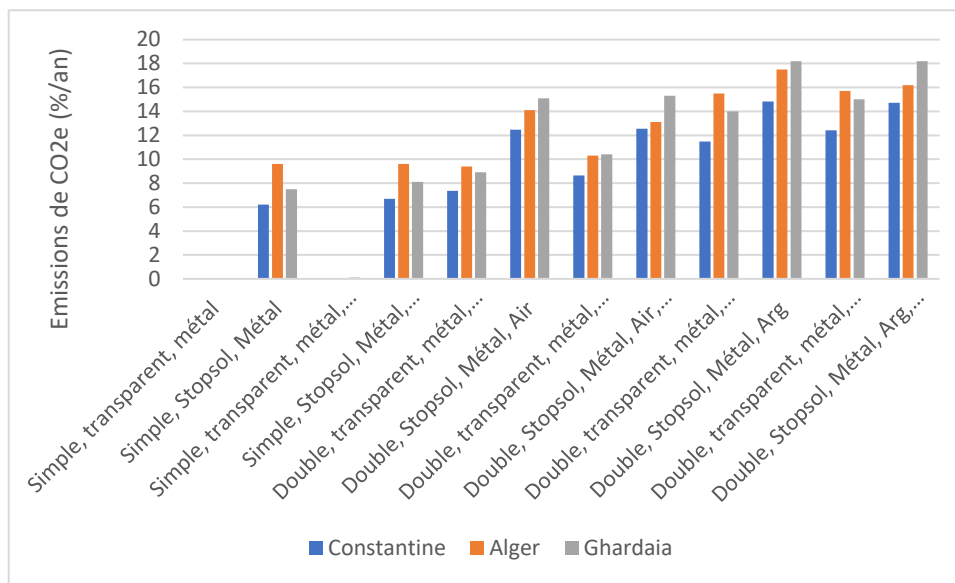


Figure 5.16 Effets des variations des types de fenêtres d'orientations sur les résultats des émissions de CO2e (%/an)

Source : (Auteur, 2022)

Les résultats présentent l'effet du changement de type de fenêtre sur la réduction des émissions de CO2e dans les trois climats différents. Les résultats exposent le potentiel de chaque type de fenêtre à réduire les émissions de CO2e (Figure 5.16).

Dans les trois climats étudiés, les fenêtres à double vitrage, avec revêtement solaire, cadre en métal et remplissage de gaz d'argon se distinguent par leur capacité à réduire considérablement les émissions de CO2e. En effet, elles offrent un potentiel de réduction allant jusqu'à 14.8 %/an pour Constantine, 16.2 %/an pour Alger et 18.2 %/an pour Ghardaïa. Cette corrélation directe entre la réduction des émissions de CO2e et la réduction de la consommation énergétique des bâtiments met en lumière l'importance cruciale des choix de fenêtres dans la lutte contre les émissions de gaz à effet de serre.

Ces résultats illustrent le rôle essentiel que jouent les fenêtres dans la réduction des impacts environnementaux des bâtiments. Les types de fenêtres qui permettent des

économies énergétiques significatives contribuent de manière substantielle à la réduction des émissions de CO₂e, renforçant ainsi la notion que des stratégies de conception orientées vers l'efficacité énergétique peuvent apporter des avantages environnementaux considérables.

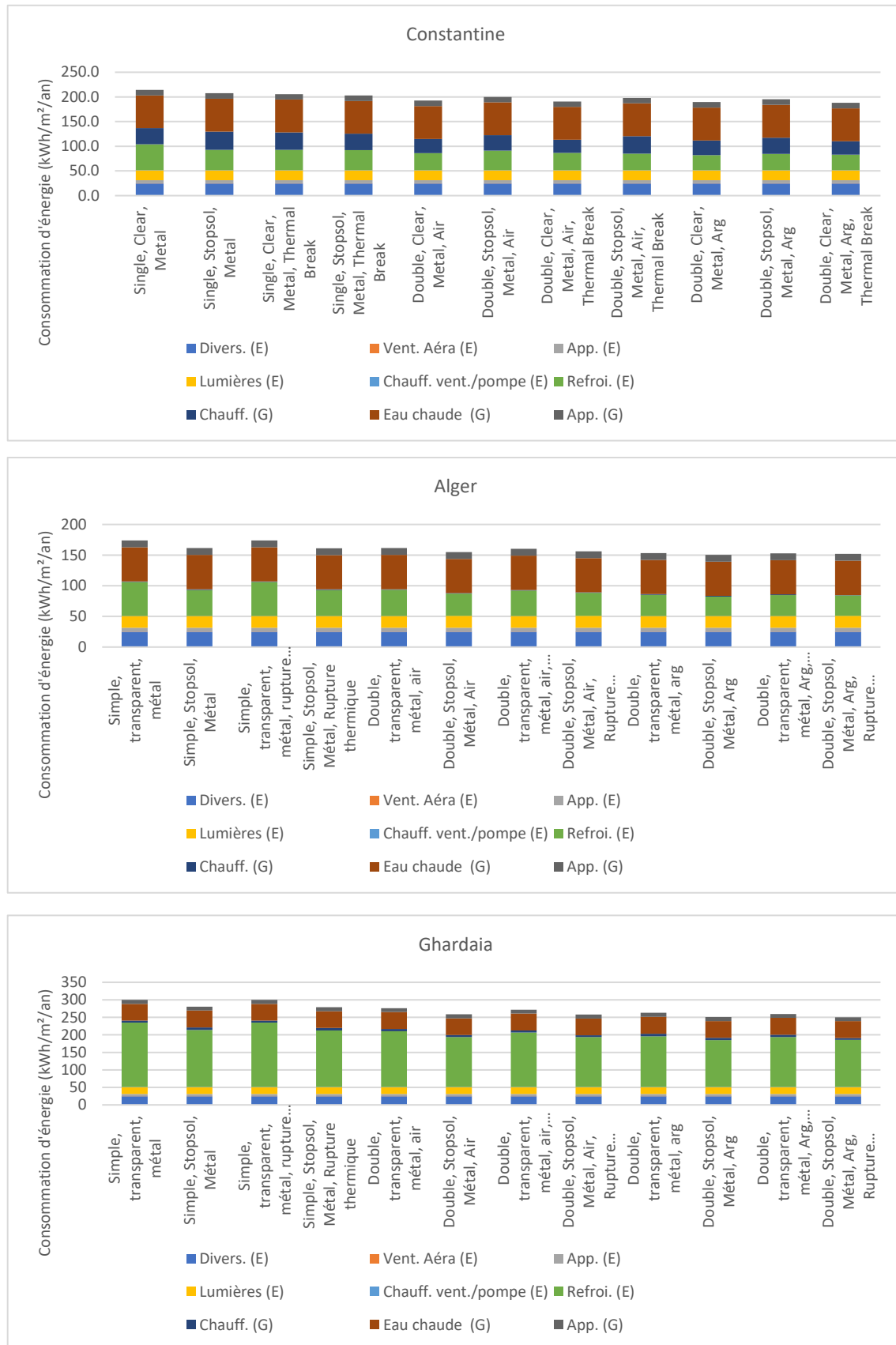


Figure 5.17 Effets des variations des types de fenêtres s sur les résultats de consommation finale d'énergie (Appartement 03)

Source : (Auteur, 2022)

Les résultats représentent l'impact du changement des types de fenêtres sur la

consommation finale d'énergie dans les différents climats étudiés (Figure 5.17). Les résultats soulignent que les variations dans la consommation énergétique finale sont principalement attribuables aux besoins en refroidissement. Les fenêtres dotées d'une isolation au gaz et d'une réduction des gains de chaleur présentent le plus grand potentiel pour réduire la consommation d'énergie liée à la climatisation, contribuant ainsi à la réduction globale de la consommation énergétique.

Il est impératif de noter que d'autres catégories telles que l'éclairage et le chauffage manifestent quelques variations en fonction des différents types de fenêtres. Il est tout aussi crucial de prendre en compte des aspects tels que la qualité de la vue, le confort thermique et la lumière naturelle lors de la sélection des types de fenêtres.

Ces résultats soulignent l'importance d'une approche holistique dans le choix des fenêtres, en tenant compte des diverses influences sur la performance énergétique et le confort des occupants. L'efficacité énergétique ne doit pas être envisagée de manière isolée, mais plutôt dans un contexte plus large où des facteurs tels que le bien-être des occupants et l'impact environnemental jouent également un rôle significatif.

1.5. WWR

Le WWR (Window-to-Wall Ratio), également appelé taux de surface vitrée, est une mesure utilisée dans la conception des bâtiments pour analyser et déterminer la proportion de la surface des fenêtres par rapport à la surface totale des murs extérieurs. Il est calculé en divisant la surface des fenêtres par la surface totale des murs, généralement exprimé en pourcentage. Le WWR joue un rôle crucial dans l'efficacité énergétique des bâtiments, et son impact sur la consommation d'énergie dépend de plusieurs facteurs tels que le climat et l'isolation. De nombreuses études ont été menées pour examiner leur relation dans différents types de bâtiments et dans divers climats, et ont déterminé que généralement, plus le WWR est élevé, plus la consommation énergétique augmente. (Hikmat et al., 2020) (Attia et al., 2012) (Krarti & Ihm, 2016) (Kapsalaki et al., 2012) (Rodriguez-Ubinas et al., 2014). Il existe différentes possibilités de pourcentages WWR adoptés dans le bâtiment variant de 10 % à 90 % (Tableau 5.8).

Tableau 5.8 Variantes des WWR et leurs retours sur investissement.

Source : (Auteur, 2022)

	Retour sur investissement (ans)		
	Constantine	Alger	Ghardaïa
WWR 10%	0.9	0.9	0.4
WWR 20%	10.4	10.4	5.1
WWR 22% (Cas d'étude)	0.0	0.0	0.0
WWR 30%	/	/	/
WWR 40%	/	/	/
WWR 50%	/	/	/
WWR 60%	/	/	/
WWR 70%	/	/	/
WWR 80%	/	/	/
WWR 90%	/	/	/

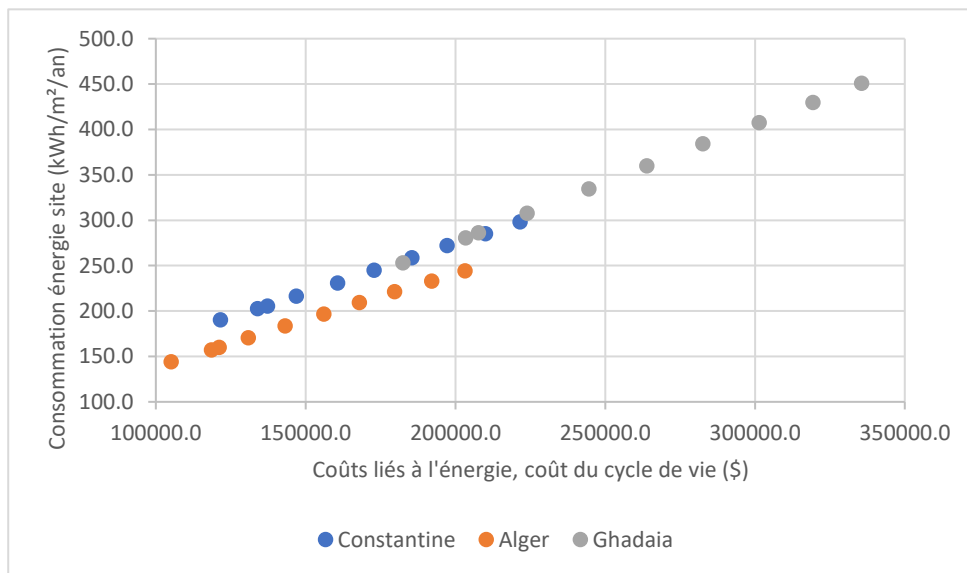


Figure 5.18 Effets des variations d'orientations sur l'optimalité de la consommation énergétique et du cout

Source : (Auteur, 2022)

Les résultats illustrent l'impact de la variation WWR sur la consommation énergétique du site dans les trois climats étudiés, ils mettent en lumière la relation qui peut être observée entre cette stratégie et la consommation énergétique pour chaque climat (Figure 5.18).

En général, il est évident dans tous les climats qu'il existe une relation prononcée entre le WWR et la consommation énergétique, où une augmentation du WWR conduit à une plus grande consommation d'énergie. Plus précisément à Constantine, les résultats montrent une hausse progressive de la consommation énergétique à mesure que le WWR augmente. Par exemple, avec un WWR de 10%, la consommation énergétique est de 190,2 kWh/m²/an, et

lorsque le WWR est porté à 90%, la consommation énergétique augmente également jusqu'à 298,1 kWh/m²/an, ce qui représente une augmentation d'environ 107,9 kWh/m²/an, correspondant à un total annuel de 91715 kWh. Cette augmentation de la consommation d'énergie entraîne une augmentation du ERC et du LCC, atteignant jusqu'à 100033 \$ par an.

De manière analogue, dans le cas d'Alger, les résultats montrent un schéma similaire. Avec un WWR de 10%, la consommation énergétique est de 144,1 kWh/m²/an, tandis qu'un WWR de 90% donne une consommation énergétique de 244,1 kWh/m²/an, indiquant une augmentation de 100 kWh/m²/an et une élévation correspondante du ERC et du LCC, atteignant 98130 \$. En ce qui concerne Ghardaïa, la tendance reste similaire, mais avec une consommation énergétique plus élevée. Un WWR de 10% entraîne une consommation énergétique de 253 kWh/m²/an, qui atteint 450,7 kWh/m²/an avec un WWR de 90%, signifiant une augmentation de 197,7 kWh/m²/an. Ces constatations soulignent que le WWR exerce un impact plus important dans les régions caractérisées par un climat aride, tel que Ghardaïa.

Cette augmentation de la consommation d'énergie peut être attribuée au gain solaire accru facilité par les fenêtres, qui devient plus marqué à mesure que le WWR augmente. Les résultats mettent en évidence l'importance d'une planification minutieuse du WWR, en particulier dans les climats arides, pour atténuer la consommation d'énergie et améliorer l'efficacité énergétique globale du bâtiment.

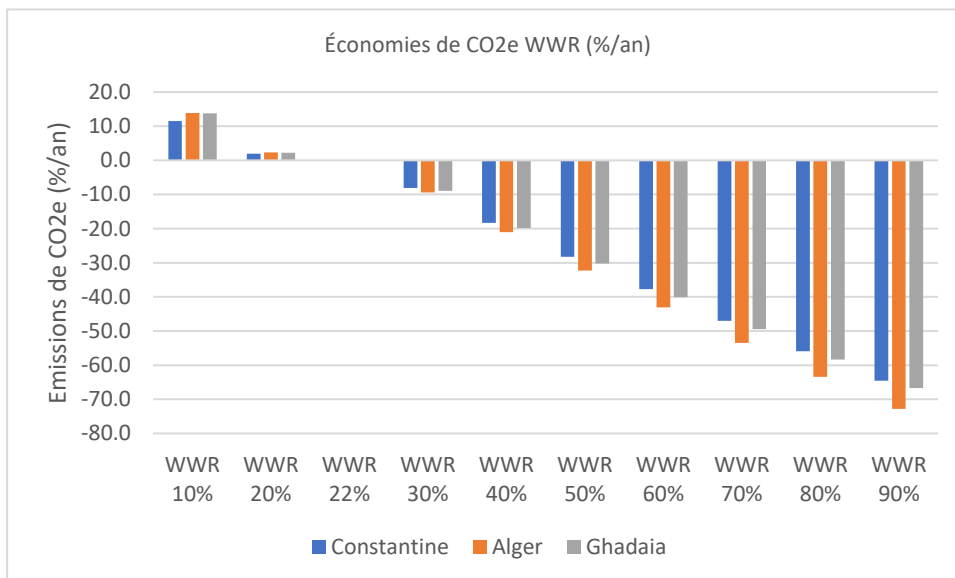


Figure 5.19 Effets des variations du WWR sur les résultats des émissions de CO2e (%/an)

Source : (Auteur, 2022)

Les résultats exposent l'impact du changement du WWR sur les économies de CO₂e dans les trois climats étudiés. Ces résultats illustrent la relation qui peut exister entre ces deux variables (Figure 5.19).

De manière similaire au schéma observé pour la consommation énergétique, il est apparent que les économies de CO₂e diminuent à mesure que le WWR augmente. Les économies potentielles varient considérablement, atteignant jusqu'à 76%, 92,7% et 80,5% par an pour les climats de Constantine, Alger et Ghardaïa respectivement. Ces résultats indiquent clairement que le WWR exerce une influence significative sur les réductions d'émissions de CO₂e dans les trois climats étudiés. Cette corrélation souligne l'importance



Figure 5.20 Effets des variations du WWR sur les résultats de consommation finale d'énergie (Appartement 03)

Source : (Auteur, 2022)

de considérer soigneusement le rapport fenêtre-mur lors de la conception des bâtiments en

vue d'optimiser leur efficacité énergétique et leur impact environnemental.

Les résultats présentent les variations de la consommation énergétique finale de l'appartement étudié en fonction des variations du WWR (Figure 5.20). Les données révèlent une augmentation de la consommation énergétique à mesure que le WWR augmente, avec des impacts plus prononcés sur le chauffage et le refroidissement. Dans la perspective d'un concept de bâtiment biophilique, qui privilégie la lumière naturelle et les vues vers l'extérieur à travers des fenêtres plus larges, il est recommandé d'équilibrer ces aspects avec une vigilance constante envers la consommation énergétique et l'efficacité énergétique du bâtiment.

Il est important de trouver le point d'équilibre optimal entre l'intégration de la lumière naturelle et la réduction de la consommation énergétique. Cela peut être réalisé en utilisant un WWR soigneusement calculé et en incorporant des éléments tels que des auvents, des vitrages énergétiquement efficaces et une isolation adéquate pour minimiser les effets négatifs d'un WWR élevé. Cette approche permet d'optimiser simultanément la performance énergétique du bâtiment tout en offrant un environnement intérieur agréable et éclairé.

1.6. Auvents

Les auvents dans les bâtiments sont des structures qui permettent d'offrir de l'ombre et de protéger principalement les fenêtres ainsi que la structure elle-même contre les éléments extérieurs. Ils peuvent être construits de différentes manières et présenter des designs variés. Plusieurs études ont été menées, démontrant l'efficacité des auvents en tant que stratégie passive pour réduire la consommation énergétique (Torcellini & Crawley, 2006) (Sun et al., 2018) (Missoum et al., 2014) (Leckner & Zmeureanu, 2011) al., 2012). Dans notre étude, différentes longueurs d'auvent en béton ont été examinées (Tableau 5.9).

Tableau 5.9 Variantes des auvents et leurs retours sur investissement.

Source : (Auteur, 2022)

	Retour sur investissement (ans)		
	Constantine	Alger	Ghardaïa
Aucun	0.0	0.0	0.0
Auvent Béton 30cm	1.0	1.4	0.8
Auvent Béton 15cm	0.9	0.4	0.2
Auvent Béton 45cm	1.2	0.8	0.5
Auvent Béton 60cm	1.4	0.9	0.5
Auvent Béton 90cm	2.0	1.1	0.7

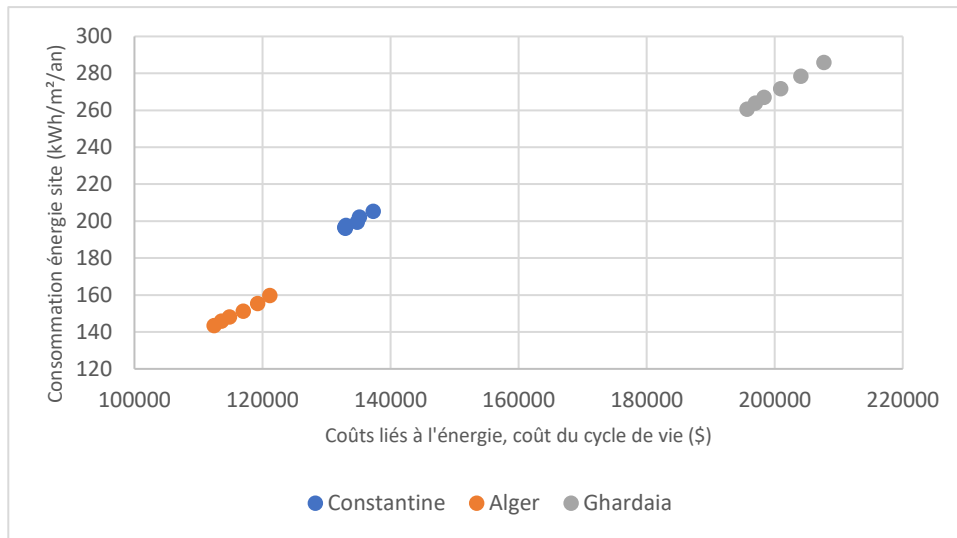


Figure 5.21 Effets des variations des longueurs d’auvents sur l’optimalité de la consommation énergétique et du cout

Source : (Auteur, 2022)

Les résultats démontrent une corrélation entre la consommation énergétique du site et la longueur des auvents. À mesure que la longueur des auvents augmente, une tendance à la diminution de la consommation énergétique dans les trois climats étudiés se manifeste. Cette tendance peut être attribuée à l'effet d'ombrage généré par ces auvents, réduisant directement l'apport de chaleur au bâtiment. Notamment, dans toutes les régions, la variante la plus économe en énergie se révèle être l'auvent de 90 cm de longueur, engendrant des économies

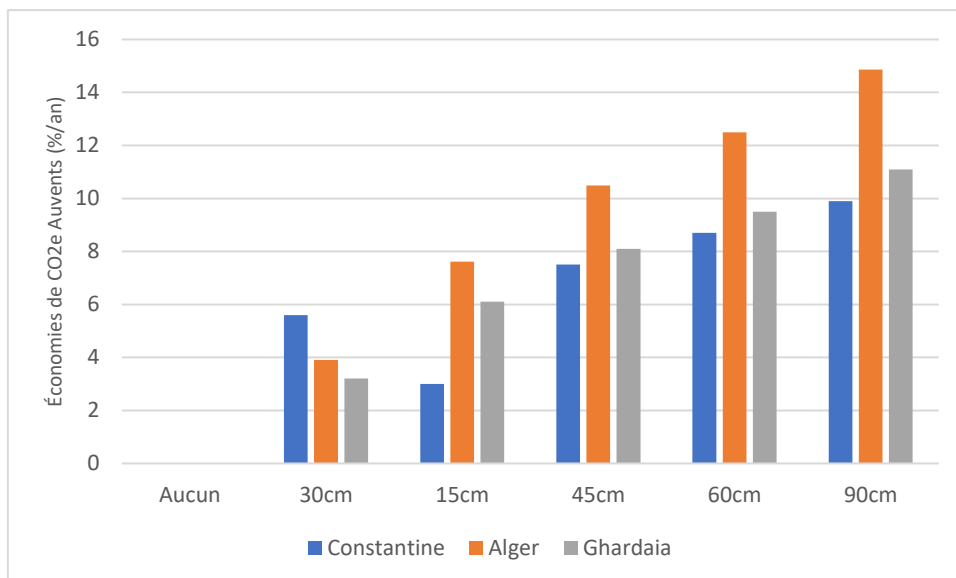


Figure 5.22 Effets des variations des longueurs d’auvents sur les résultats des émissions de CO2e (%/an)

Source : (Auteur, 2022)

de 9.2, 16.4 et 25.4 kWh/m²/an pour les climats de Constantine, Alger et Ghardaïa respectivement. Les tendances observées dans les indicateurs ERC et LCC reflètent celles de la consommation énergétique. Les auvents de plus grande longueur génèrent des valeurs inférieures d'ERC et de LCC. Bien que le coût initial des auvents plus longs soit supérieur, à long terme, il s'avère que ces solutions se révèlent plus rentables. Par exemple, l'auvent de 90 cm permet des économies totales de 4320.6, 8704 et 11972 \$ respectivement. Pour déterminer la longueur optimale des auvents pour chaque climat, il est crucial de prendre en compte non seulement la consommation énergétique, l'ERC et le LCC des différentes variantes, mais aussi les effets potentiels sur la lumière naturelle et le confort intérieur des occupants. D'autres facteurs tels que la conception architecturale et l'esthétique doivent également être pris en considération (Figure 5.21).

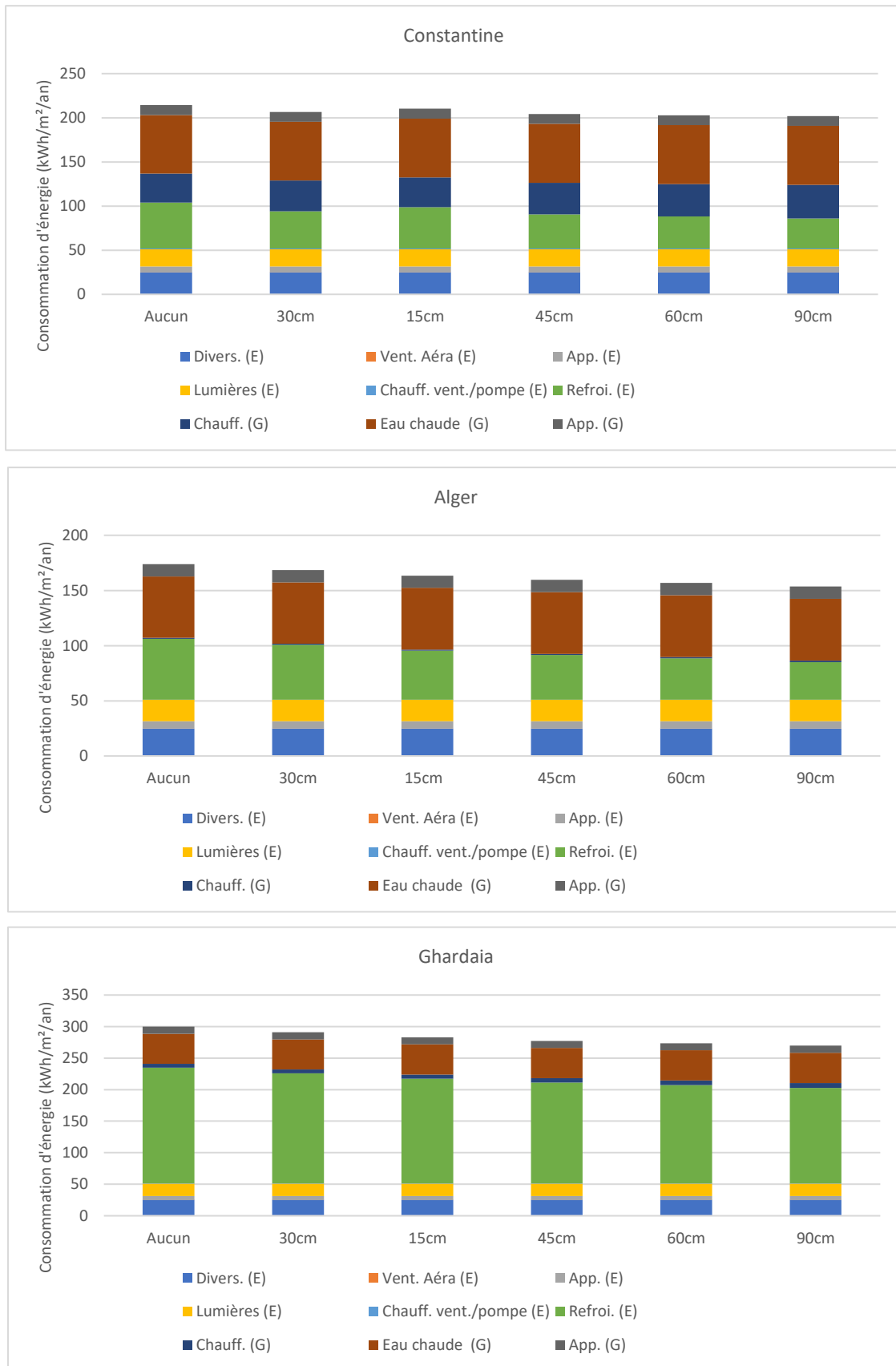


Figure 5.23 Effets des variations des longueurs d'avants sur les résultats de consommation finale d'énergie (Appartement 03)

Source : (Auteur, 2022)

En conclusion, il est évident que les auvents présentent un potentiel considérable dans

l'optimisation de la consommation énergétique des bâtiments. Cette étude met en lumière l'importance de l'intégration d'éléments d'ombrage efficaces dans la conception des bâtiments en vue de réduire la demande énergétique et d'améliorer la durabilité.

Les résultats révèlent qu'une augmentation de la longueur des auvents engendre une amélioration de la réduction des émissions de CO₂e, atteignant jusqu'à 9.9% pour Constantine, 14.9% pour Alger et 11.1% pour Ghardaïa. Ces résultats soulignent l'importance significative des auvents dans la réduction des émissions de CO₂e et mettent en évidence leur rôle crucial en tant que stratégie de durabilité dans le contexte de la conception architecturale (Figure 5.22).

Les résultats révèlent une stabilité de la consommation énergétique dans la plupart des catégories, mais une diminution est observée dans les catégories telles que la climatisation et le chauffage. Ainsi, l'augmentation de la longueur des auvents conduit à une amélioration des performances énergétiques du bâtiment en réduisant la consommation d'énergie associée au confort thermique (Figure 5.23). Cette tendance suggère que les auvents peuvent jouer un rôle essentiel dans l'optimisation de l'efficacité énergétique et du confort intérieur du bâtiment, en particulier en régulant les besoins de refroidissement et de chauffage.

1.7. Etanchéité a l'air

L'étanchéité à l'air dans un bâtiment se réfère à la résistance du bâtiment aux infiltrations d'air à travers les différentes lacunes, fissures et ouvertures de l'enveloppe. Il revêt une grande importance pour réduire ces infiltrations et exfiltrations depuis l'extérieur afin d'améliorer l'efficacité énergétique du bâtiment (Hikmat et al., 2020) (Krarti & Ihm, 2016) (Kapsalaki et al., 2012). Améliorer l'étanchéité contribue non seulement à renforcer l'efficacité énergétique, mais également à améliorer le confort intérieur, la qualité de l'air intérieur et la durabilité globale du bâtiment. Dans notre étude, différentes variantes d'étanchéité à l'air ont été examinées (Tableau 5.10).

Tableau 5.10 Variantes d'étanchéité et leurs retours sur investissement.

Source : (Auteur, 2022)

	Retour sur investissement (ans)		
	Constantine	Alger	Ghardaïa
50 ACH50	0	0	0
25 ACH50	6.9	/	2.1
10 ACH50	9.3	/	4.5
7 ACH50	10.1	/	5.7
5 ACH50	11.7	/	7.8
2 ACH50	14.6	/	9.3
1 ACH50	17.4	/	10.6

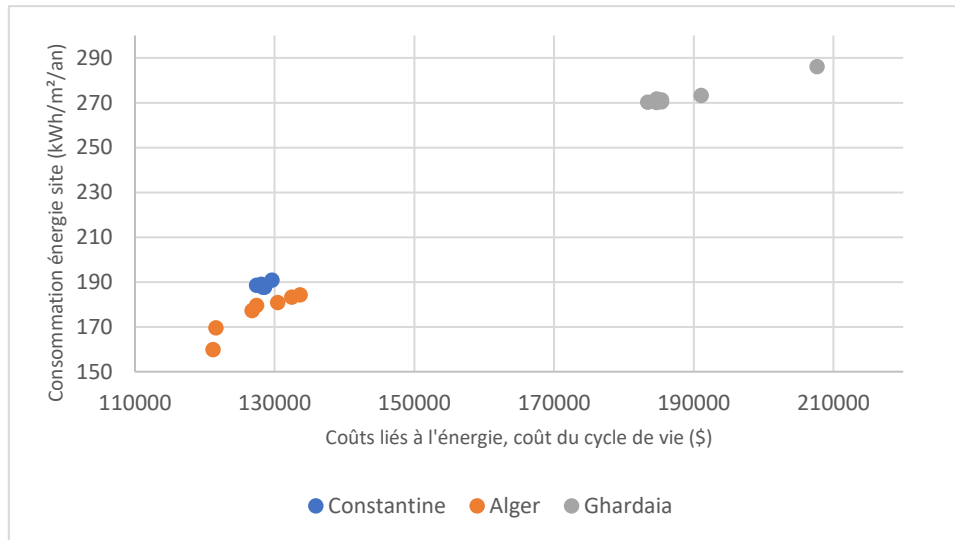


Figure 5.24 Effets des variations de l'étanchéité à l'air sur l'optimalité de la consommation énergétique et du cout

Source : (Auteur, 2022)

Les résultats présentent l'effet du changement de l'étanchéité à l'air des bâtiments sur la consommation énergétique du site ainsi que sur le ERC, LCC dans les climats étudiés (Figure 5.24). Les résultats indiquent que pour le climat de Constantine, une augmentation de l'étanchéité à l'air contribue à réduire la consommation énergétique, passant de 205.4 kWh/m²/an à 188.0 kWh/m²/an avec une étanchéité de 5ACH50. Cependant, on observe ensuite une légère augmentation de la consommation à 188.9 kWh/m²/an pour une étanchéité de 1ACH50. Globalement, dans ce climat, la variation de l'étanchéité n'a pas un impact significatif sur la consommation énergétique. Une tendance similaire est observée pour le climat de Ghardaïa, où le changement de l'étanchéité à l'air permet une économie de 15.9 kWh/m²/an pour le cas le plus favorable, correspondant à une étanchéité de 10ACH50. En revanche, pour le climat d'Alger, un accroissement de l'étanchéité entraîne une augmentation de la consommation énergétique, avec le cas de 50ACH50 étant le plus favorable. En ce qui concerne l'ERC, LCC, l'amélioration de l'étanchéité à l'air du bâtiment se traduit par un impact positif dans les climats de Constantine et Ghardaïa, générant des économies allant jusqu'à 2222 \$ et 22268.6 \$ respectivement. Cependant, pour le climat d'Alger, aucun bénéfice n'est observé avec le changement d'étanchéité, au contraire, cela entraînerait une perte de -6208.9 \$. En termes de retour sur investissement, des valeurs relativement positives sont notées, atteignant 6.9 ans à Constantine pour la valeur d'étanchéité la plus optimale et 4.5 ans pour Ghardaïa.

Ces résultats démontrent l'impact significatif de l'étanchéité à l'air sur la performance énergétique et économique des bâtiments, en soulignant l'importance de prendre en compte ce facteur dans la conception et la construction pour atteindre des niveaux élevés d'efficacité énergétique.

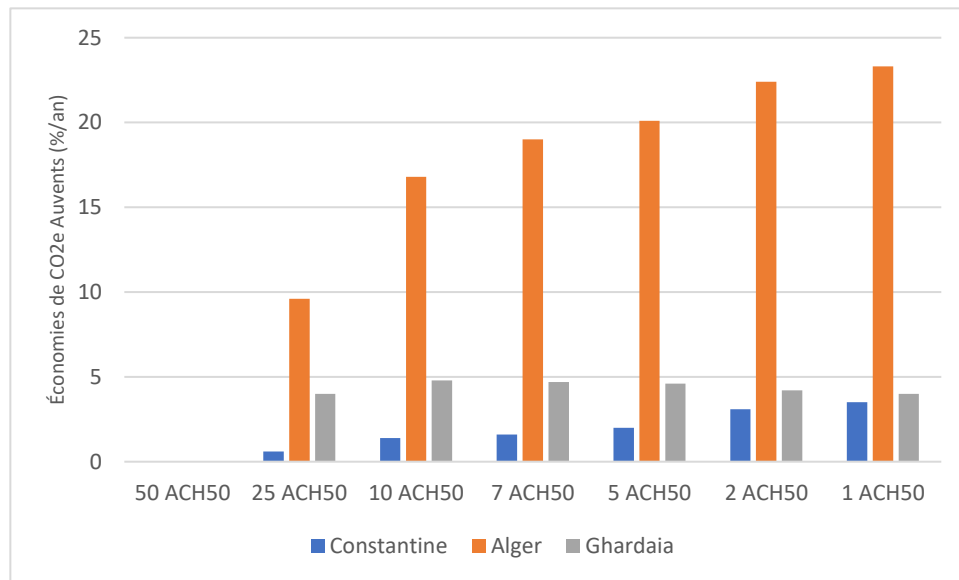


Figure 5.25 Effets des variations de l'étanchéité à l'air sur les résultats des émissions de CO2e (%/an)

Source : (Auteur, 2022)

Parmi les différents niveaux d'étanchéité à l'air, la réduction la plus significative des émissions de CO2e a été observée, atteignant 3.5% par an et 23.3% par an avec l'étanchéité de 1ACH50 pour les climats de Constantine et Alger respectivement. Dans le cas du climat de Ghardaïa, une réduction de 4.8% par an a été atteinte avec l'étanchéité de 10ACH50. Les résultats soulignent que l'amélioration de l'étanchéité à l'air des bâtiments contribue à une amélioration de la réduction des émissions de CO2e dans les trois climats étudiés. Une meilleure étanchéité se traduit par une plus grande réduction des émissions. Cette observation met en évidence l'importance cruciale de l'étanchéité efficace des bâtiments pour non seulement réduire les émissions de carbone, mais aussi pour améliorer globalement l'efficacité énergétique du bâtiment (Figure 5.25).

Ces résultats réaffirment l'impératif de prendre des mesures adéquates pour renforcer l'étanchéité à l'air des bâtiments, en mettant l'accent sur l'amélioration de l'efficacité énergétique et la réduction des impacts environnementaux associés aux émissions de gaz à effet de serre.

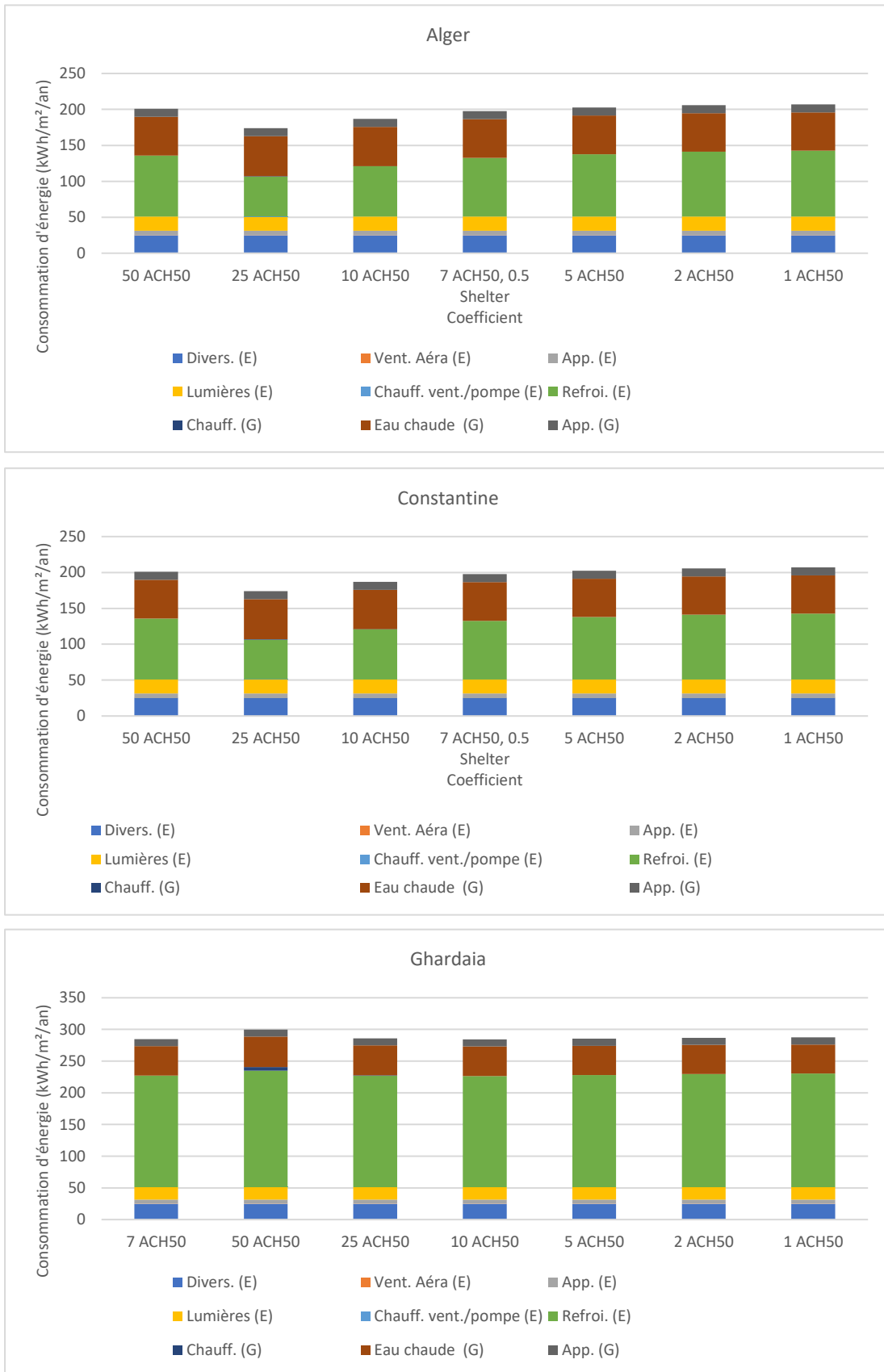


Figure 5.26 Effets des variations de l'étanchéité à l'air sur les résultats de consommation finale d'énergie (Appartement 03)

Source : (Auteur, 2022)

Les résultats illustrent l'impact du changement de l'étanchéité à l'air du bâtiment sur la

consommation énergétique finale de l'appartement étudié, en fonction des climats (Figure 5.26). Ces résultats varient en agissant principalement sur le chauffage et la climatisation, contribuant à une diminution de 31.8 kWh/m²/an dans la consommation due au chauffage et à une augmentation de 21 kWh/m²/an dans la consommation due à la climatisation pour le climat de Constantine. Pour le climat d'Alger, cette variante a un impact particulièrement sur la consommation due à la climatisation, avec un gain pouvant atteindre 27 kWh/m²/an pour l'étanchéité la plus optimale, à savoir 25ACH50. Dans le contexte du climat de Ghardaïa, une amélioration de l'étanchéité vers le niveau 25ACH50 contribue à réduire les consommations liées au chauffage et à la climatisation, atteignant jusqu'à 7.7 kWh/m²/an pour la climatisation et 5.5 kWh/m²/an pour le chauffage.

Ces résultats soulignent que, par rapport à l'ensemble du bâtiment, les stratégies d'optimisation de l'étanchéité à l'air varient et dépendent des spécificités des climats. En conséquence, il est essentiel que les appartements individuels soient améliorés en termes d'étanchéité à l'air de manière distincte, et que chaque appartement soit doté de son propre niveau d'étanchéité en fonction de sa position dans le bâtiment.

Cela met en évidence l'importance de la personnalisation des stratégies d'optimisation de l'étanchéité à l'air en fonction de l'emplacement géographique et des caractéristiques spécifiques du bâtiment, afin d'assurer une efficacité énergétique optimale et des performances environnementales accrues.

1.8. Ventilation naturelle

La ventilation naturelle est une méthode passive visant à introduire de l'air dans un bâtiment en exploitant les forces naturelles telles que la vitesse des vents ou les différences de pression. Contrairement à la ventilation mécanique, la ventilation naturelle tire parti des éléments naturels pour assurer la circulation d'air au sein du bâtiment. Cette approche passive contribue à réduire la consommation énergétique du bâtiment, améliorer le confort intérieur, et ce, sans entraîner de coûts de construction additionnels (Hikmat et al., 2020) (Kibert & Fard, 2012) (Harkouss, 2018) (Torcellini & Crawley, 2006) (Sun et al., 2018) (Cao et al., 2016) (Mcnabb, 2013) (Oh et al., 2017).

Dans notre étude, différentes alternatives ont été utilisées dans la simulation énergétique pour évaluer l'effet de la ventilation naturelle et l'utilisation des ouvertures par les occupants (Tableau 5.11).

Tableau 5.11 Variantes de la ventilation naturels et leurs retours sur investissement.

Source : (Auteur, 2022)

	Retour sur investissement (ans)		
	Constantine	Alger	Ghardaïa
Aucune	0.0	0.0	0.0
Toute l'année, 3 jours/semaine	0.0	0.0	0.0
Toute l'année, 7 jours/semaine	0.0	0.0	0.0
Toute l'année, 7 jours/semaine, Toutes les fenêtres	0.0	0.0	0.0

Les résultats illustrent l'impact du changement du temps d'ouverture des fenêtres, c'est-à-dire la fréquence de la ventilation naturelle, sur la consommation énergétique, l'ERC et le LCC dans les trois climats étudiés (Figure 5.27).

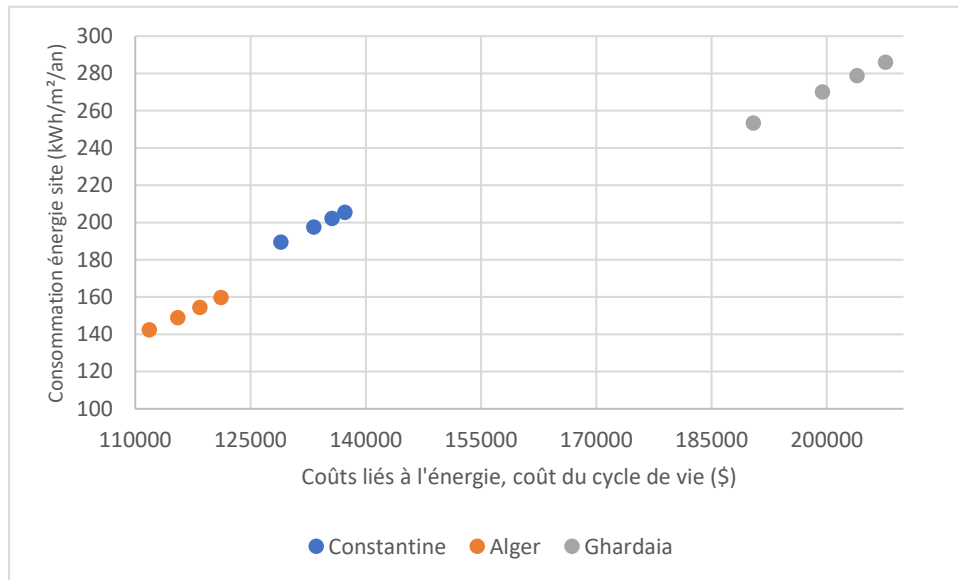


Figure 5.27 Effets des variations la ventilation naturelle sur l'optimalité de la consommation énergétique et du cout

Source : (Auteur, 2022)

En ce qui concerne la consommation énergétique, il est notable que le scénario avec la plus grande consommation énergétique est celui où il n'y a pas de ventilation naturelle, tandis que le scénario le plus favorable est celui avec une ventilation naturelle continue tout au long de l'année. Ce changement dans la fréquence de ventilation naturelle permet une réduction de la consommation énergétique de 5.9, 17.5 et 32.6 kWh/m²/an respectivement pour les climats de Constantine, Alger et Ghardaïa. Cela a également un impact significatif sur l'ERC et le LCC, avec des économies atteignant 8330.6, 9317.5 et 17224.3 \$ respectivement.

En termes de retour sur investissement, les changements de fréquence de la ventilation naturelle n'engendrent aucun coût additionnel, ce qui signifie qu'ils offrent un retour sur investissement direct.

En conclusion, il est évident que l'augmentation de la fréquence de la ventilation naturelle à un certain niveau peut optimiser à la fois la consommation énergétique et les coûts des bâtiments dans les trois climats étudiés. Cette stratégie s'inscrit dans le cadre d'une approche de conception durable visant à maximiser l'utilisation des ressources naturelles pour améliorer l'efficacité énergétique et réduire l'impact environnemental des bâtiments.

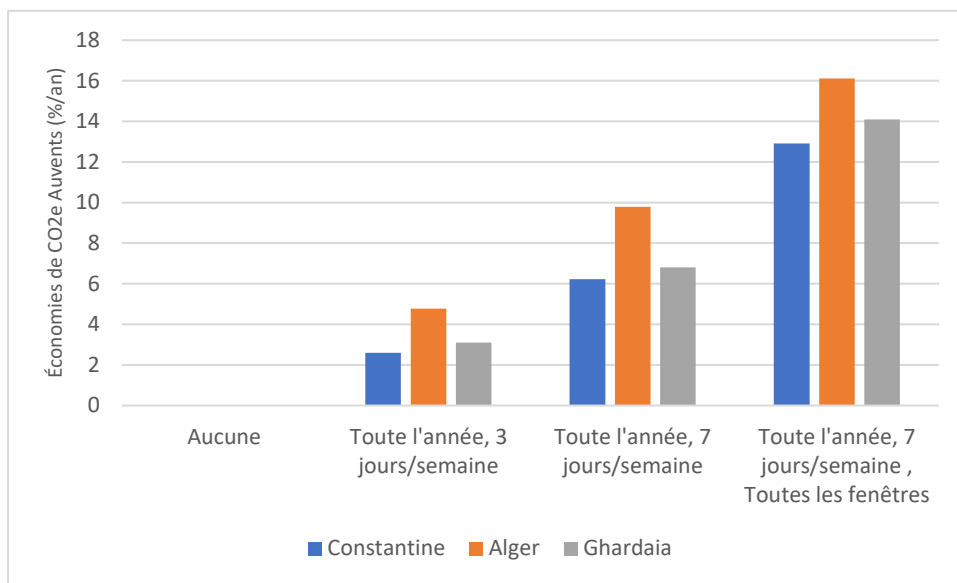


Figure 5.28 Effets des variations la ventilation naturelle sur les résultats des émissions de CO2e (%/an)

Source : (Auteur, 2022)

Les données illustrent l'impact de la modification de la fréquence de la ventilation naturelle sur les émissions de CO2e dans le bâtiment, en tenant compte des trois climats étudiés (Figure 5.28).

Suivant une logique similaire à celle de la consommation énergétique, une fréquence de ventilation de sept jours par semaine, tout au long de l'année, et avec toutes les fenêtres ouvertes, conduit à une réduction accrue des émissions de CO2e de 12,91 %, 16,11 % et 14,1 % par an dans les climats de Constantine, Alger et Ghardaïa respectivement.

Ces résultats confirment l'importance des stratégies de ventilation naturelle optimisées pour réduire l'empreinte carbone des bâtiments dans des conditions climatiques variables. Cette conclusion s'aligne avec le paradigme plus vaste de la conception durable, qui met l'accent sur l'exploitation des ressources naturelles pour favoriser l'efficacité énergétique et la préservation de l'environnement.

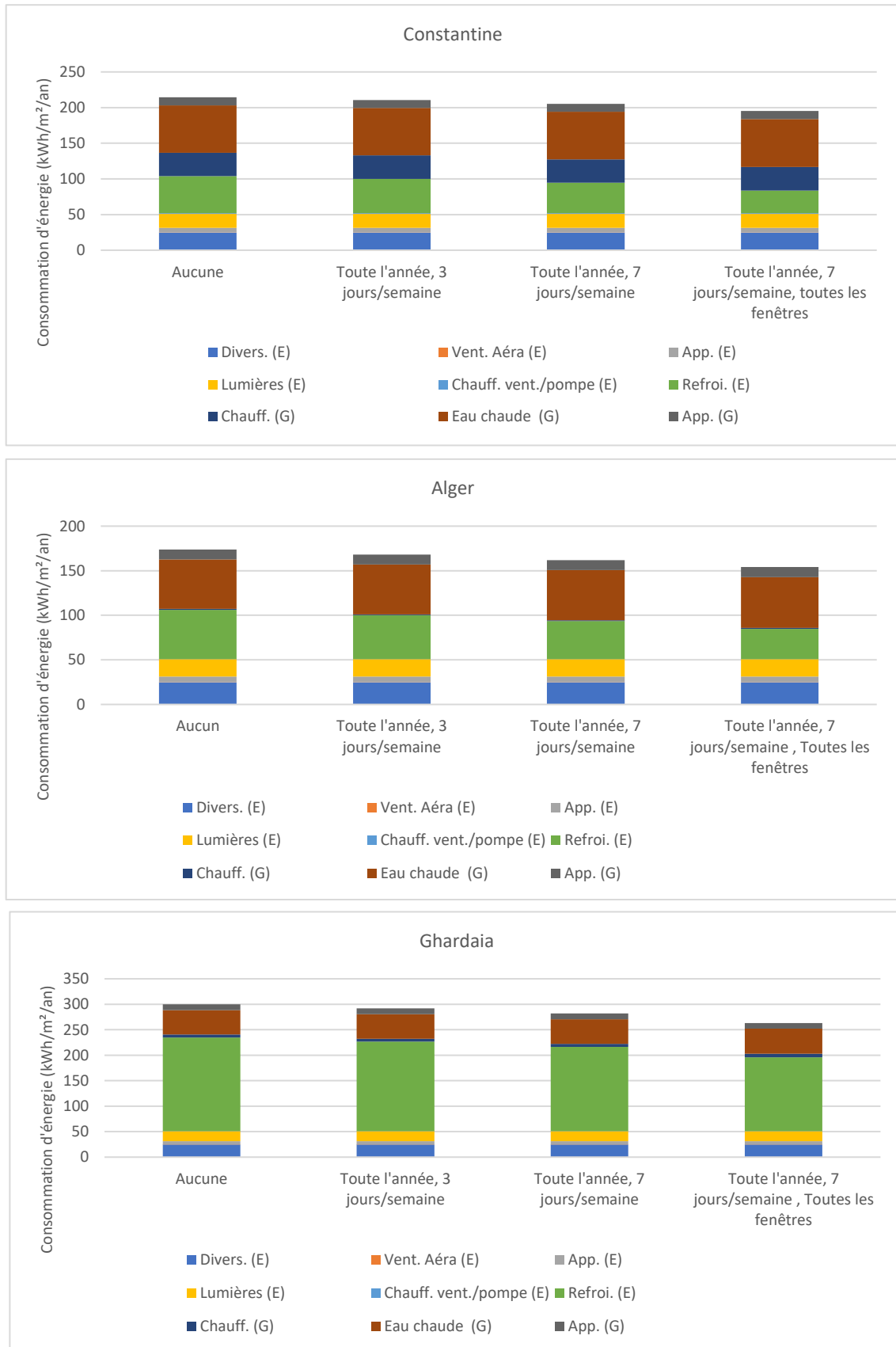


Figure 5.29 Effets des variations de la ventilation naturelle sur les résultats de consommation finale d'énergie (Appartement 03)

Source : (Auteur, 2022)

modification de la fréquence de ventilation naturelle dans le bâtiment sur la consommation énergétique finale, en prenant en compte les trois climats étudiés (Figure 5.29).

Les résultats obtenus révèlent que la majorité des catégories de consommation énergétique finale demeurent stables, à l'exception du refroidissement et du chauffage qui affichent des variations. D'une manière générale, la consommation énergétique associée au refroidissement diminue de manière significative, avec des réductions de 20,2 kWh/m²/an, 21,5 kWh/m²/an et 38,9 kWh/m²/an respectivement pour les climats de Constantine, Alger et Ghardaïa. En ce qui concerne le chauffage, les variations observées sont moins prononcées, ne dépassant pas 1,5 kWh/m²/an dans les différents climats.

En conclusion, il est notable que la modification de la fréquence de ventilation dans les bâtiments a une incidence sur différentes catégories de consommation finale. Bien que les variations soient minimales pour la majorité des catégories, il est important de souligner que la catégorie de refroidissement est celle qui est la plus impactée. Il est également à noter que le changement de fréquence de ventilation naturelle, en tant que stratégie passive, permet de réaliser des économies substantielles en matière de consommation énergétique. Ces résultats soulignent l'efficacité potentielle d'une telle mesure pour améliorer la performance énergétique globale des bâtiments.

Conclusion

Dans le cadre de ce chapitre, une exploration approfondie des stratégies passives utilisées dans la conception architecturale a été entreprise dans le but de minimiser la consommation énergétique, tout en demeurant attentif aux implications économiques. Les différentes simulations ont été menées en tenant compte de trois contextes climatiques distincts : Constantine, Alger et Ghardaïa.

Le tableau suivant vise à synthétiser de manière exhaustive les résultats optimaux découlant des diverses stratégies envisagées (Tableau 5.12).

Tableau 5.12 Résultats optimaux découlant des différentes stratégies envisagées.

Source : (Auteur, 2023)

Stratégies/climats	Réduction de l'énergie %			Réduction des émissions %			Retour sur investissement (ans)		
	Constantine	Alger	Ghardaïa	Constantine	Alger	Ghardaïa	Constantine	Alger	Ghardaïa
Orientations	3.5	3.9	5.5	5.2	5.3	6.3	0.0	0.0	0.0
Effet inter-bâtiments	1.0	7.2	5.0	5.2	10.6	6.7	0.0	0.0	0.0
Mur Valeurs U	25.7	0.0	5.2	0.4	0.0	5.4	10.7	0.0	7.8
Dalle Valeurs U	0.1	0.1	0.2	0.1	0.2	0.3	6178.1	1727.3	0.0
Sol	0.3	0.2	0.2	0.4	0.2	0.2	662.8	1692.8	385.5
Plafond	6.3	0.0	2.4	3.3	0.0	1.4	29.5	0.0	23.2
Type de fenêtre	10.0	12.4	15.3	14.8	17.5	18.2	3.9	4.0	1.8
WWR	7.4	9.8	11.5	11.5	13.9	13.8	0.9	0.9	0.4
Auvents	4.5	10.2	8.9	9.9	14.9	11.1	2.0	1.1	0.7
Etanchéité a l'air	7.1	12.4	5.6	1.3	19.0	4.8	2.8	0.0	4.5
Ventilation naturelle	7.7	10.9	11.4	12.9	16.1	14.1	0.0	0.0	0.0

Les répercussions significatives de ces stratégies sur des aspects clés tels que la consommation énergétique, les considérations financières et les émissions de gaz à effet de serre sont mises en évidence par ce tableau. Cette démarche méthodique renforce la

contribution apportée à la compréhension approfondie des stratégies passives dans le contexte de la conception énergétique des bâtiments (Tableau 5.12).

L'analyse approfondie des stratégies passives dans le cadre de ce chapitre révèle des tendances significatives. Premièrement, les orientations et l'effet inter-bâtiments se démarquent par des réductions substantielles de la consommation d'énergie et des émissions, accompagnées d'un retour sur investissement nul, soulignant ainsi leur rentabilité à court terme. En revanche, les divers types de murs, bien que démontrant des réductions notables, impliquent des retours sur investissement exigeant un investissement initial conséquent. Les dalles, ainsi que les isolations du sol et du plafond, exhibent une influence limitée sur la consommation d'énergie et les émissions, tout en présentant des retours sur investissement remarquablement élevés, soulignant la nécessité de coûts initiaux substantiels pour des avantages modestes. Les stratégies liées au type de fenêtre et au rapport fenêtre/façade (WWR) affichent généralement des performances positives, bien que les retours sur investissement demeurent relativement modestes, indiquant une rentabilité à court terme. Enfin, les auvents, l'étanchéité à l'air et la ventilation naturelle démontrent des réductions significatives, avec des retours sur investissement variables mais assez faible.

Les résultats soulignent impérieusement la nécessité d'une optimisation minutieuse et d'une sélection avisée des différentes stratégies passive, conformément aux caractéristiques spécifiques des climats étudiés. Cette démarche de sélection éclairée, en symbiose avec les paramètres climatiques locaux, offre le potentiel substantiel de réduire considérablement la consommation énergétique, les émissions de CO₂e et d'améliorer les retours sur investissement associés à chaque stratégie envisagée. En conséquence, une telle approche permet d'établir une intégration cohérente et durable des principes et des stratégies de construction au sein des divers contextes architecturaux.

CHAPITRE -VI- STRATEGIES ACTIVE ET ENR DE LA NET ZERO ENERGIE

Introduction

« La technologie est un élément important dans le progrès. Nous pouvons toujours faire quelque chose de mieux. Il y a toujours un progrès à faire en utilisant la technologie, et c'est là où commence l'innovation »

— Santiago Calatrava

L'énergie et l'architecture ont toujours été étroitement liées, remontant aux temps anciens où l'architecture passive était le seul moyen d'obtenir un bâtiment avec un certain niveau de confort. Plus récemment, les stratégies actives sont devenues des éléments essentiels dans la conception des bâtiments, devenant principalement le domaine des ingénieurs et des spécialistes. Ces systèmes actifs mécaniques et électriques ont la capacité de s'adapter et de fonctionner avec n'importe quelle solution de conception et dans n'importe quel climat. Cependant, leur utilisation rationnelle est cruciale pour éviter les risques environnementaux potentiels.

L'objectif principal de ce chapitre est de fournir une compréhension approfondie des stratégies énergétiques actives et énergie renouvelable, en mettant en lumière leurs applications multiples dans différents composants essentiels des bâtiments. Ces composants comprennent des systèmes modernes tels que le chauffage, la climatisation, l'éclairage et la distribution d'eau chaude. Dans ce contexte, l'intégration d'énergies renouvelables, notamment les panneaux solaires, émerge aussi comme un élément clé qui débloque le plein potentiel de la réalisation d'une énergie net zéro. Suite à cela, la partie pratique intervient avec la mise à l'épreuve de ces stratégies au moyen de simulations, qui faciliteront la sélection de stratégies optimales pour diverses catégories. Ce processus permet une comparaison approfondie du rôle crucial joué par ces stratégies dans le cheminement vers l'optimisation de l'efficacité énergétique et la réalisation d'une énergie net zéro.

Au travers de cette analyse, l'objectif global consiste à contribuer à une meilleure compréhension de la relation symbiotique entre les stratégies énergétiques, les systèmes de bâtiments et les spécificités climatiques. Cette démarche collective s'inscrit dans une perspective de promotion de l'efficacité énergétique et d'avancement vers un avenir durable.

1. Les stratégies actives

1.1. Chauffage, ventilation et climatisation (CVC)

Le système de chauffage, de ventilation et de climatisation (CVC) constitue un élément fondamental au sein des structures architecturales, ayant pour vocation la préservation du confort au sein des environnements bâtis. Cette infrastructure se subdivise en deux composantes distinctes. La première réside dans les systèmes de chauffage et de climatisation, lesquels s'emploient à maintenir des conditions de température intérieure optimales en générant soit de la chaleur ou un refroidissement approprié, tout en contribuant à la déshumidification interne afin de prévenir les risques de moisissures, d'odeurs et de contaminants. La seconde se matérialise dans le mécanisme de ventilation, dont la mission est de renouveler l'air intérieur avec celui de l'extérieur, assurant ainsi une atmosphère intérieure fraîche et salubre (Mitchell & Braun, 2012).

L'application du système de CVC peut engendrer de multiples bénéfices, notamment dans :

- Le maintien d'un confort thermique et intérieur, ainsi qu'un niveau d'humidité adéquat.
- La préservation de la qualité de l'air par le biais d'une ventilation visant à éliminer les contaminants.
- L'optimisation de l'efficacité énergétique, notamment au moyen de l'intégration de systèmes récents à haut rendement énergétique.
- La promotion de la santé et de la sécurité, en instaurant un contrôle rigoureux sur les niveaux d'humidité et de température.
- Ainsi, le système CVC s'impose comme un pilier essentiel dans la création d'environnements propices à la vie quotidienne, en garantissant des conditions de vie et de travail qui favorisent le bien-être et la productivité.

Plusieurs chercheurs ont examiné minutieusement les différentes composantes du CVC, et ont évalué leur contribution à l'efficacité énergétique. Leurs investigations ont abouti à la mise en évidence que les technologies novatrices liées au CVC confèrent une capacité substantielle de réalisation d'économies énergétiques significatives (Hikmat et al., 2020) (Kibert & Fard, 2012) (Harkouss, 2018) (Sun et al., 2018).

1.1.1. Climatisation centrale

Le système de climatisation central revêt la particularité de réguler la température des bâtiments par le biais d'une unité centrale, plutôt que de recourir à plusieurs unités individuelles dans chaque espace. Principalement adopté au sein des structures commerciales ou administratives, ce système trouve également sa pertinence dans les hôtels et les édifices résidentiels. La mécanique opérationnelle du système repose sur un ensemble de composants, notamment des ventilateurs, des groupes frigorifiques, des tours de refroidissement et des capteurs. L'unité centrale exerce le calcul et le contrôle de la température globale à l'intérieur du bâtiment (Baird et al., 1985).

Des investigations ont révélé que l'utilisation de la climatisation centrale entraîne une augmentation de la consommation énergétique. Ainsi, il revêt une importance cruciale de procéder à une conception méthodique ainsi qu'à une surveillance attentive des niveaux de consommation énergétique, afin de maîtriser les impacts financiers et environnementaux associés à ce système (Rodriguez-Ubinas et al., 2014) (Mcnabb, 2013).

Dans notre étude, différentes variantes systèmes de climatisation centrales disponibles en Algérie ainsi que leur retour sur investissement ont été examinées (Tableau 6.1).

Tableau 6.1 Variantes de la climatisation centrale et leurs retours sur investissement.

Source : (Auteur, 2023)

	Retour sur investissement (ans)		
	Constantine	Alger	Ghardaïa
Split SEER 14	96.7	92.4	43.0
Split SEER 20	101.2	96.2	46.2
Monobloc SEER 18	159.2	151.1	71.9
Monobloc SEER 13	125.4	119.7	55.3

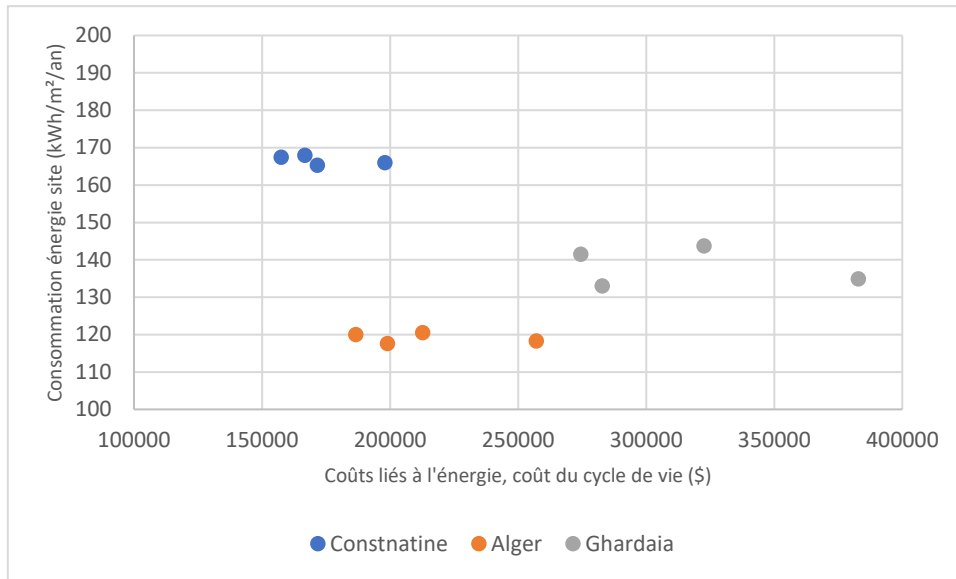


Figure 6.1 Effets des variations de climatisation centrale sur l'optimalité de la consommation énergétique et du cout

Source : (Auteur, 2023)

Les résultats obtenus, analysent la consommation énergétique du site en utilisant les Coûts Liés à l'Énergie (ERC) et les Coûts du Cycle de Vie (LCC) dans les trois climats étudiés (Figure 6.1). Ces résultats révèlent qu'une augmentation du Ratio de Rendement Énergétique Saisonnier (SEER), qui indique l'efficacité énergétique, conduit à une réduction de la consommation énergétique ainsi que des ERC et des LCC pour le bâtiment dans les trois climats étudiés. Opter pour le Split SEER 20, qui est l'option la plus économe en énergie, entraîne une diminution de 40,1, 42,4 et 153 kWh/m²/an dans la consommation d'énergie, mais augmente également les ERC et les LCC de 34 274,9 \$, 77 552,6 \$ et 74 943,7 \$ respectivement pour les climats de Constantine, Alger et Ghardaïa.

Parmi les options envisagées, le climat de Constantine semble avoir les valeurs d'ERC et de LCC les plus basses, tandis que Ghardaïa présente les valeurs les plus élevées. Cependant, il est important de noter que Ghardaïa présente le potentiel de retour sur investissement le plus élevé par rapport aux deux autres climats.

En général, les résultats indiquent que le développement de composants vers des éléments plus économes en énergie, en particulier ceux avec des valeurs SEER plus élevées, contribue à réduire la consommation énergétique du bâtiment. Cette considération devrait également prendre en compte les climats spécifiques lors du choix du type approprié à utiliser. De plus, Ghardaïa présente le plus grand potentiel en termes de retour sur investissement et d'économies de consommation énergétique.

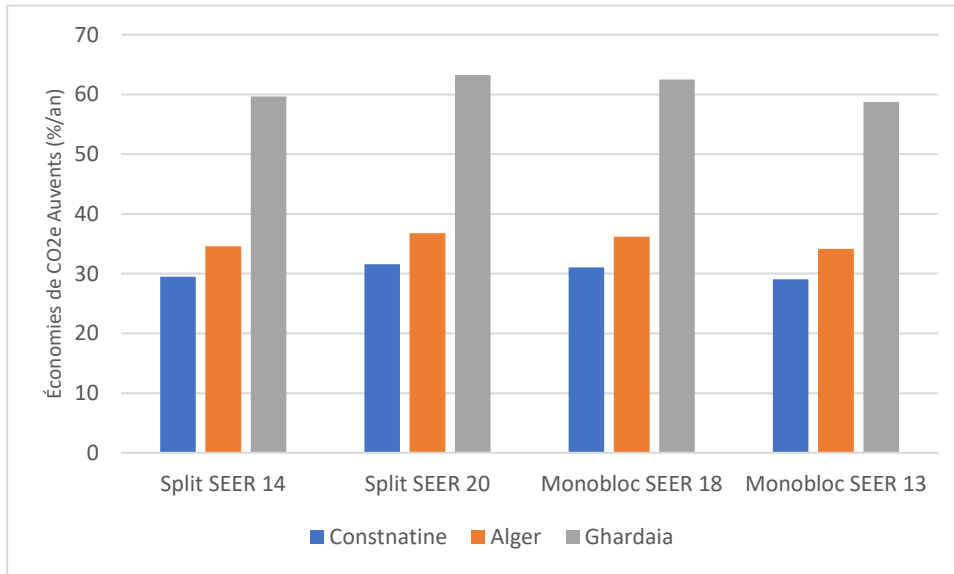


Figure 6.2 Effets des variations de climatisations centrales sur les résultats des émissions de CO2e (%/an)

Source : (Auteur, 2023)

Par rapport au cas d'étude, les différentes options de climatisation démontrent une réduction des émissions de CO2e avec l'augmentation des SEER. Le split SEER 20 et le monobloc SEER 18 affichent les valeurs les plus élevées, et ces valeurs sont presque identiques pour tous les climats étudiés, atteignant jusqu'à 63,27 % par an. De plus, il est remarquable que Ghardaïa semble présenter le plus grand potentiel de réduction d'émissions de CO2e, suivi par Alger, puis Constantine. Cette analyse confirme que le passage à des machines plus efficaces sur le plan énergétique permet bel et bien de réduire les émissions de CO2e (Figure 6.2).

1.1.2. Climatisation simple

À l'opposé du concept de la climatisation centrale, la climatisation individuelle, également connue sous le nom de climatisation simple, est spécifiquement conçue pour tempérer un espace singulier plutôt que l'intégralité d'un édifice. Ce système est couramment adopté dans le contexte résidentiel et repose sur une structure bipartite. La première composante, située à l'intérieur, est composée d'un évaporateur et d'un dispositif de traitement de l'air. La seconde, à l'extérieur, englobe un condenseur et un compresseur. Ces deux unités fonctionnent en tandem et sont interconnectées par des conduits. Cette configuration est généralement désignée sous l'appellation "split", une terminologie illustrative de la séparation opérée entre la portion froide et chaude de ce système (Pout & Hitchin, 2009) (Bory et al., 2006).

Ce mode de climatisation individuelle est très prisé dans les édifices résidentiels en raison de sa facilité d'installation, de son rendement énergétique optimal, et de sa capacité à réguler des températures différentes pour chaque espace. De plus, ce système offre un niveau sonore moindre, ce qui en fait une option particulièrement silencieuse et discrète (Hikmat et al., 2020) (Sun et al., 2018) (Szalay & Zöld, 2014) (Taherahmadi et al., 2021).

Dans notre étude, différentes variantes systèmes de climatisation disponible en Algérie ainsi que leur retour sur investissement ont été examinées (Tableau 6.2).

Tableau 6.2 Variantes des systèmes de climatisation split et leurs retours sur investissement.

Source : (Auteur, 2023)

	Retour sur investissement (ans)		
	Constantine	Alger	Ghardaïa
B EER 2.7	0	0	0
A+++ EER 7.4	-6	-5.8	-1.6
A++ EER 6.1 to 8.5	-5.1	-4.9	-1.3
A+ EER 5.6 to 6.1	-3.6	-3.5	-0.9
A EER 5.1 to 5.6	-2	-1.9	-0.5

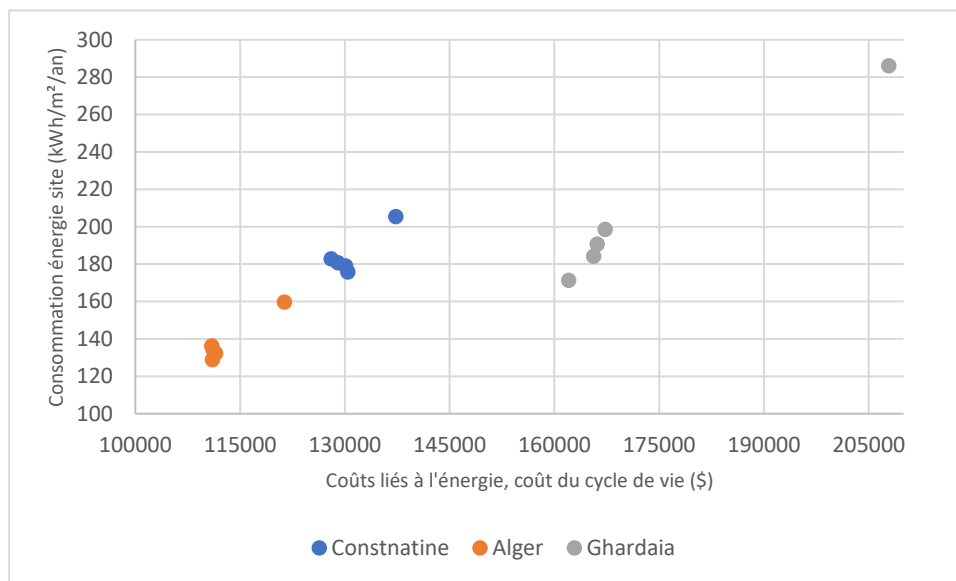


Figure 6.3 Effets des variations de climatiseur sur l'optimalité de la consommation énergétique et du cout

Source : (Auteur, 2023)

L'analyse des données de l'impact du changement d'option de climatisation sur l'efficacité énergétique de la climatisation ainsi que sur les ERC et les LCC dans les différents climats étudiés (Figure 6.3), nous permet de tirer plusieurs conclusions. Tout d'abord, il existe une corrélation positive entre les systèmes ayant un EER élevé, plus le système dispose d'un EER élevé, plus sa consommation énergétique diminue.

Deuxièmement, le système avec un EER de 2.7 présente une consommation énergétique plus élevée par rapport aux autres EER, qui affichent des consommations énergétiques presque identiques. Troisièmement, il est confirmé qu'une augmentation de l'EER contribue à réduire la consommation énergétique ainsi que les ERC et les LCC des différentes options. Enfin, il est à noter que les systèmes avec un EER plus élevé nécessitent un retour sur investissement plus long en raison de leurs coûts initiaux plus élevés.

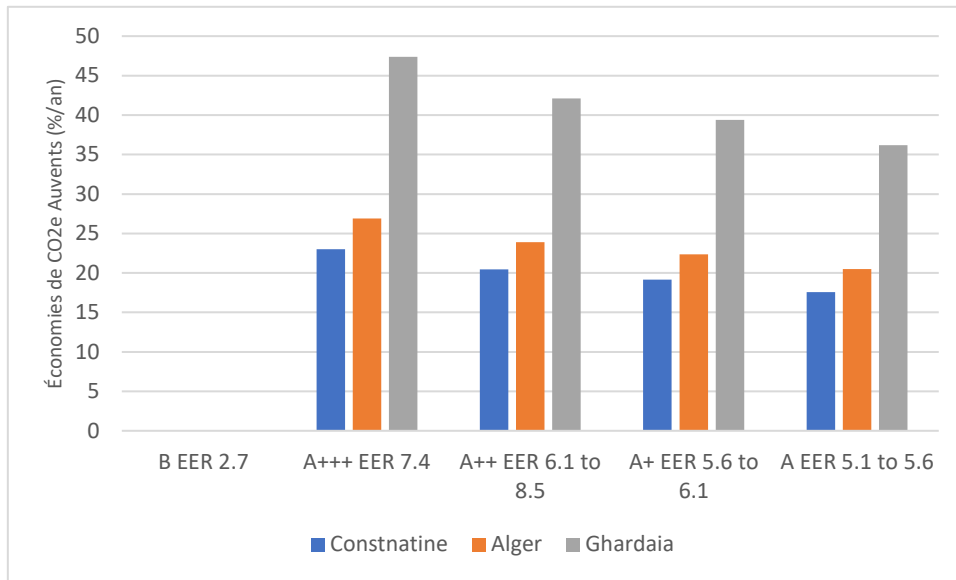


Figure 6.4 Effets des variations de climatiseurs sur les résultats des émissions de CO2e (%/an)

Source : (Auteur, 2023)

Les résultats mettent en évidence que l'utilisation de systèmes présentant un EER plus élevé contribue à réduire les émissions de CO2e (Figure 6.4), soulignant ainsi l'importance cruciale du choix judicieux des types de climatisation au sein du contexte architectural. À titre d'illustration, le cas du système avec un EER de 7,4 et une classification A+++ est instructif, permettant une réduction de 23 %, 26,7 % et 47,4 % par an respectivement dans les climats de Constantine, Alger et Ghardaïa. Il est à noter que Ghardaïa révèle le potentiel de réduction le plus prononcé en matière d'émissions, suivi de près par Alger, puis Constantine.

1.1.3. Pompe à chaleur

La pompe à chaleur (PAC) constitue un dispositif d'une grande utilité au sein des édifices, ayant la capacité de transférer la chaleur d'un lieu à un autre, et ce, dans le but de procurer le chauffage ou la climatisation nécessaires. Fonctionnant en adéquation avec les préceptes de la thermodynamique, la PAC opère en extrayant la chaleur depuis une source, telles que le sol ou l'air, et en la transférant à l'intérieur du bâtiment durant les périodes

froides. À l'inverse, durant les saisons chaudes, la PAC inversera le processus en extrayant la chaleur de l'intérieur du bâtiment pour la transférer vers l'environnement extérieur (Hepbasli & Kalinci, 2009).

Les types de pompes à chaleur sont diversifiés, incluant notamment :

- Les PAC à air.
- Les PAC géothermiques.
- Les PAC à eau.

Chacun de ces types présente des avantages spécifiques, se basant sur des considérations telles que le climat, l'espace disponible et les exigences énergétiques.

Les pompes à chaleur jouent un rôle crucial dans la conception des bâtiments NZE (Li et al., 2013), du fait de leur efficacité énergétique avérée. Les études consacrées aux PAC dans les structures bâties ont clairement démontré leur potentiel en tant que solutions énergétiquement performantes et durables pour les besoins en chauffage et en climatisation. Leurs attributs intrinsèques se traduisent par une réduction de la consommation énergétique et par la diminution des émissions de gaz à effet de serre, tout en améliorant le confort intérieur des occupants (Boukli Hacene et al., 2019).

Dans notre étude, différentes variantes systèmes de PAC disponible en Algérie ainsi que leur retour sur investissement ont été examinées (Tableau 6.3).

Tableau 6.3 Variantes des pompes a chaleurs disponibles et leurs retours sur investissement.

Source : (Auteur, 2023)

	Retour sur investissement (ans)		
	Constantine	Alger	Ghardaïa
SEER 14, 8.2 HSPF COP 3.5	259.9	992.9	-226.4

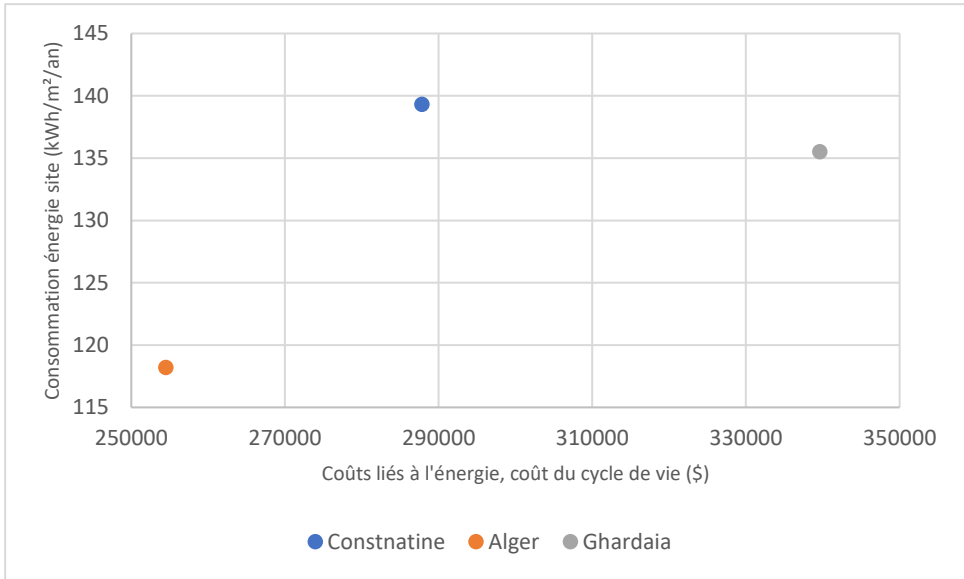


Figure 6.5 Effets des variations de pompe a chaleurs sur l'optimalité de la consommation énergétique et du cout

Source : (Auteur, 2023)

Les résultats dénotent que l'adoption d'une pompe à chaleur engendre une réduction significative de la consommation énergétique du site (Figure 6.5), atteignant jusqu'à 66, 41.8 et 154 kWh/m²/an, toutefois accompagnée d'une augmentation correspondante du paramètre ERC et LCC de 150 797 \$, 133 579.7 \$ et 132 180 \$ respectivement, pour les climats de Constantine, Alger et Ghardaïa. Ces gains sont associés à des taux de retour sur

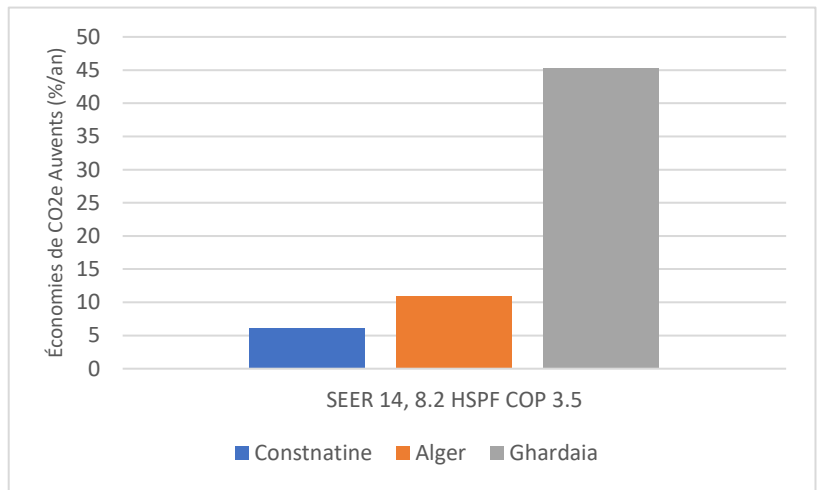


Figure 6.6 Effets des variations de la pompe a chaleur sur les résultats des émissions de CO2e (%/an)

Source : (Auteur, 2023)

investissement relativement élevés. Néanmoins, cette constatation implique que malgré les effets bénéfiques sur la consommation énergétique, l'usage des pompes à chaleur en Algérie

demeure peu rentable, en raison des coûts initiaux élevés ainsi que des dépenses liées à l'installation desdites pompes à chaleur.

Les résultats exposent l'effet induit par l'utilisation d'une pompe à chaleur SEER14 sur les émissions de CO_{2e} du bâtiment dans les climats examinés (Figure 6.6). Ces résultats corroborent que la transition du système CVC vers une pompe à chaleur engendre une diminution notable des émissions de CO_{2e} dans les différents climats étudiés, avec des réductions respectives de 6,1 %, 10,9 % et 45,3 % par an pour les climats de Constantine, Alger et Ghardaïa.

1.1.4. Chaudière

La chaudière, en tant que système destiné au chauffage des édifices et à la production d'eau chaude sanitaire, opère par le réchauffement de l'eau, qui ensuite est acheminée vers les bâtiments par l'entremise de tuyaux et de radiateurs, ces derniers propageant la chaleur par conduction. Les chaudières peuvent être alimentées par diverses sources énergétiques, parmi lesquelles le gaz et l'électricité figurent parmi les plus répandues en Algérie. De plus, les énergies renouvelables peuvent également être intégrées dans les systèmes de chaudières. Ces chaudières peuvent être classées en deux catégories : murales ou centrales. Les chaudières modernes sont conçues en vue d'optimiser leur efficacité énergétique, contribuant ainsi à la réduction de la consommation énergétique des bâtiments et à l'atténuation des dépenses énergétiques. L'incorporation de technologies novatrices telles que les condensateurs peuvent sensiblement améliorer cette efficacité. En général, les chaudières demeurent les systèmes les plus privilégiés lors de la conception de maisons individuelles ou collectives, jouant un rôle crucial dans la préservation du confort thermique des édifices (Østergaard et al., 2022).

Dans notre étude, les deux alternatives auxquelles les chaudières peuvent être rattachées en Algérie, ainsi que leur retour sur investissement ont été examinées (Tableau 6.4).

Tableau 6.4 Variantes des systèmes de distribution des chaudières et leurs retours sur investissement.

Source : (Auteur, 2023)

	Retour sur investissement (ans)		
	Constantine	Alger	Ghardaïa
Radiateur	92.9	3263.3	456.3
Serpentin	55.3	1646.6	274.4

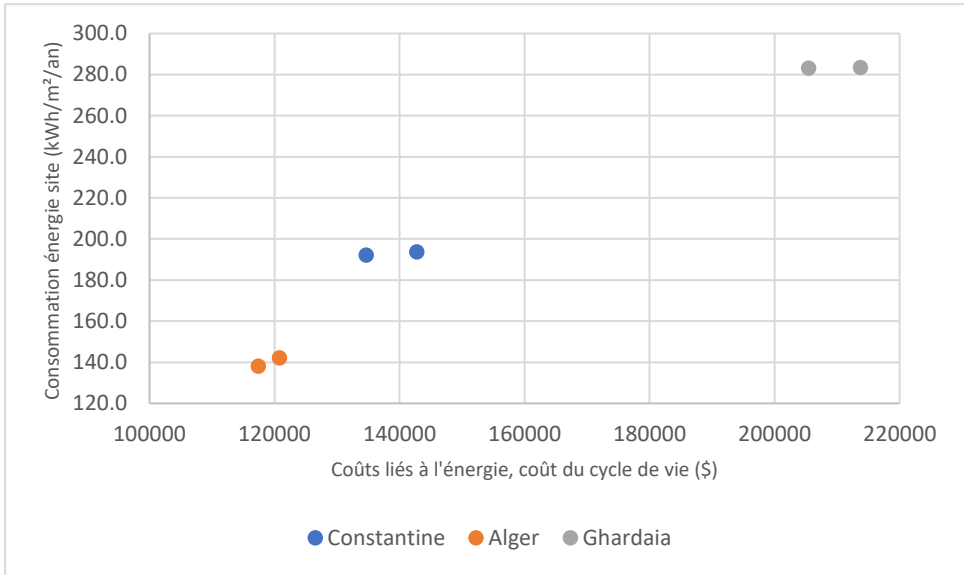


Figure 6.7 Effets des variations du système de distribution des chaudières sur l'optimalité de la consommation énergétique et du coût

Source : (Auteur, 2023)

Les résultats présentent l'impact de l'utilisation d'une chaudière à gaz sur la consommation énergétique du site ainsi que sur les indicateurs ERC et LCC des bâtiments dans les différents climats examinés. Les résultats démontrent que les deux types de chaudières, à savoir celles avec serpentin ou radiateur, engendrent quasiment la même réduction de la consommation énergétique dans les divers climats étudiés, bien que le système avec serpentin manifeste une légère avance (Figure 6.7).

Ces observations suggèrent que, compte tenu de son coût initial moindre, l'option privilégiée est celle avec serpentin. En effet, celle-ci non seulement présente un coût initial

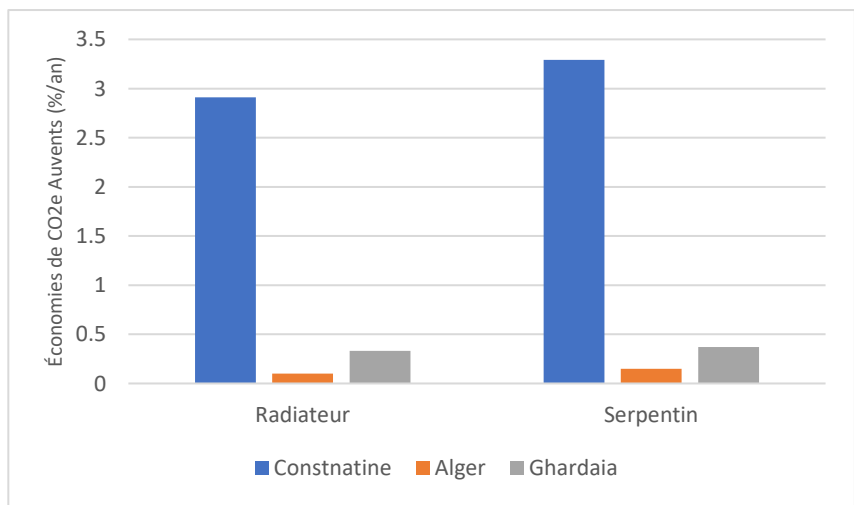


Figure 6.8 Effets des variations du système de distribution des chaudières sur les résultats des émissions de CO2e (%/an)

Source : (Auteur, 2023)

plus abordable, mais elle affiche également des valeurs inférieures d'ERC et de LCC à long terme.

Il est pertinent de noter que les différentes configurations de systèmes présentent une diminution marginale des émissions de CO₂e en comparaison avec le scénario initial, avec une réduction maximale de 3,3 %, 0,15 % et 0,37 % pour les climats de Constantine, Alger et Ghardaïa respectivement, en utilisant le système avec serpentin. Il en découle que les chaudières adoptant des serpentins se révèlent être plus efficaces, que ce soit à court ou à long terme, pour l'ensemble des régions examinées (Figure 6.8).

1.2. Eclairage artificiel

L'éclairage artificiel dans le bâtiment correspond à l'utilisation de systèmes électriques pour illuminer des espaces. Il revêt une importance cruciale dans la conception architecturale des bâtiments et joue un rôle essentiel dans le confort et le bien-être des occupants. Généralement, il est employé pour fournir un éclairage adéquat pour diverses activités qui se déroulent à l'intérieur du bâtiment. Différents systèmes d'éclairage existent, tels que les ampoules à incandescence, les lampes fluorescentes, les lampes fluorescentes compactes (LFC) et les diodes électroluminescentes (LED). Chaque type possède ses propres caractéristiques en termes d'efficacité énergétique, de température de couleur et de durée de vie. L'efficacité énergétique est un élément essentiel lorsqu'il s'agit d'éclairage artificiel, et elle est souvent utilisée comme une stratégie visant à améliorer l'efficacité énergétique des différents bâtiments (Li et al., 2006) (Doulos et al., 2014) (Hikmat et al., 2020) (Cao et al., 2016) (Oh et al., 2017).

Dans notre étude, deux variantes systèmes d'éclairage disponible en Algérie ainsi que leur retour sur investissement ont été examinées (Tableau 6.5).

Tableau 6.5 Variantes des types d'éclairage les plus utilisés et leurs retours sur investissement.

Source : (Auteur, 2023)

	Retour sur investissement (ans)		
	Constantine	Alger	Ghardaïa
Incandescence	0	0	0
LED	0	0	0

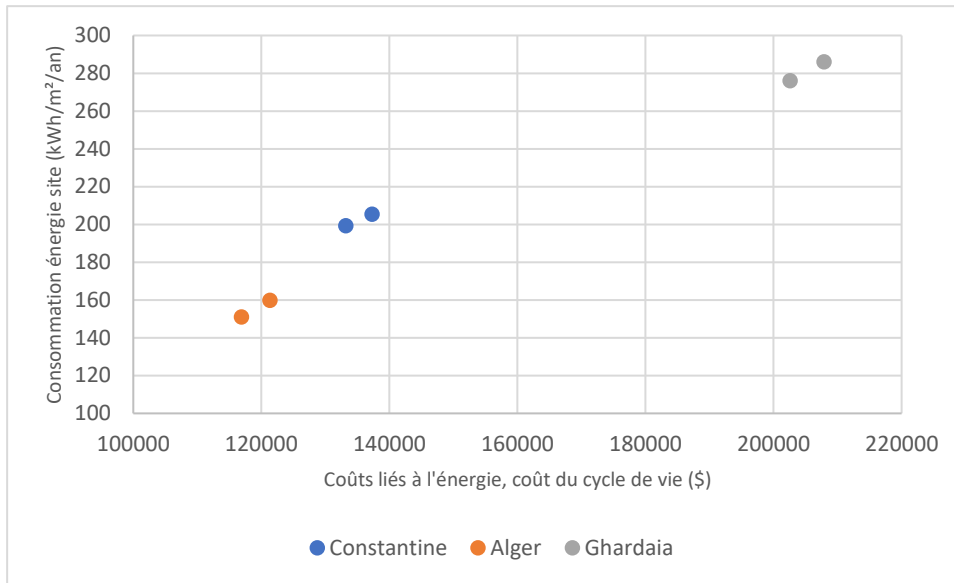


Figure 6.9 Effets des variations dans l'éclairage artificiel sur l'optimalité de la consommation énergétique et du cout

Source : (Auteur, 2023)

Les résultats exposent que la transition vers les lampes LED en remplacement des lampes à incandescence engendre des économies substantielles de consommation énergétique du site (Figure 6.9), lesquelles varient en fonction de chaque climat, soit 6,2 kWh/m²/an pour Constantine, 8,8 kWh/m²/an pour Alger et 10 kWh/m²/an pour Ghardaïa. En observant les paramètres ERC et LCC, une diminution également significative est perceptible, se chiffrant à 4083 \$ pour Constantine, 4486 \$ pour Alger et 7564 \$ pour Ghardaïa.

Il convient de souligner que la transition vers les lampes LED ne requiert pas de coûts additionnels, ce qui rend ce changement immédiatement rentable dans tous les climats étudiés. Par conséquent, les résultats exposent que l'adoption des lampes LED au sein du bâtiment constitue une option viable, permettant de réduire de manière significative la consommation énergétique, tout en induisant une diminution des paramètres ERC et LCC, avec un retour sur investissement immédiat.

Les résultats exposent l'effet de la transition de l'éclairage artificiel vers les lampes LED sur la réduction des émissions de CO₂e dans les climats étudiés (Figure 6.10). À Constantine, ce passage vers les LED entraîne une diminution de 6 % des émissions de CO₂e, dénotant ainsi une réduction substantielle par rapport aux lampes à incandescence. De manière

similaire, pour Alger et Ghardaïa, cette transition engendre des réductions respectives de 7,9 % et 4,3 %.

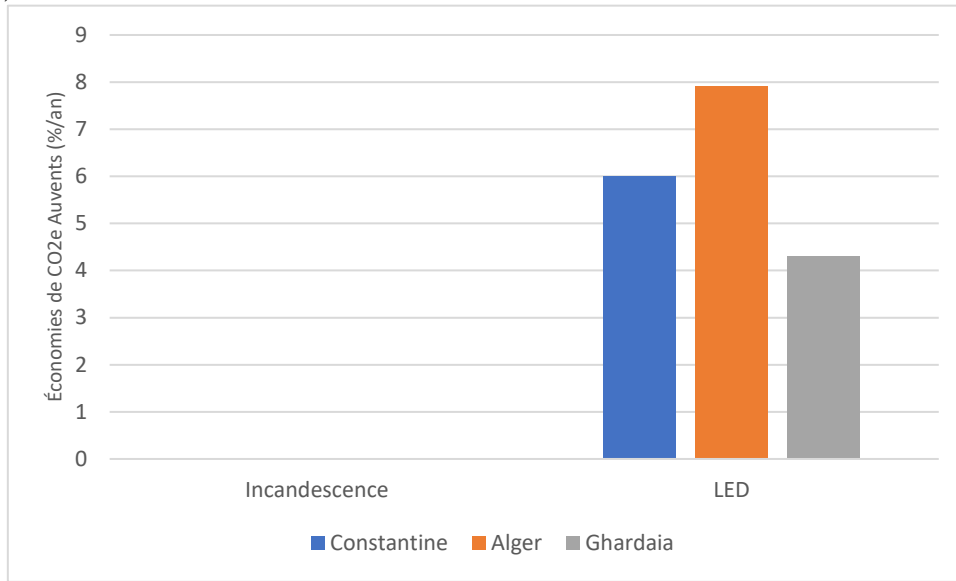


Figure 6.10 Effets des variations l'éclairage artificiel sur l'optimalité de la consommation énergétique et du cout

Source : (Auteur, 2023)

Dans l'ensemble, il est plausible de déduire que le remplacement de l'éclairage artificiel des lampes à incandescence par des LED induit une diminution notable, non seulement de la consommation énergétique, mais également des émissions de CO2e, contribuant ainsi à une démarche plus proche du concept de net zéro énergie.

1.3. Eau chaude sanitaire

Les chauffe-eaux, conformément à leur désignation, sont des dispositifs conçus pour chauffer l'eau, destinée à diverses utilisations au sein des édifices tels que le bain, le lavage et la cuisine. Ils peuvent être installés soit à l'intérieur, soit à l'extérieur du bâtiment, et sont susceptibles d'être intégrés aux systèmes de chauffage centraux. Leur intégration au sein du système de plomberie s'effectue au moyen de tuyaux, et ils peuvent être dotés d'un réservoir ou fonctionner sans celui-ci (Kerfah et al., 2020) (Riedy et al., 2011) (Gaonwe et al., 2019). Les chauffe-eaux offrent une variété d'avantages, notamment :

- La réalisation d'économies d'énergie.
- Une montée en température rapide de l'eau.
- Une efficacité thermique élevée.
- Une utilisation aisée.

Ces équipements de chauffe-eau peuvent être adoptés aussi bien dans les nouvelles constructions que dans les bâtiments plus anciens, offrant ainsi une solution polyvalente pour répondre aux besoins en eau chaude (Gaonwe et al., 2019).

Dans notre étude, deux variantes systèmes de chauffe-eau disponible en Algérie ainsi que leur retour sur investissement ont été examinées (Tableau 6.6).

Tableau 6.6 Variantes des chauffe-eaux et leurs retours sur investissement.

Source : (Auteur, 2023)

	Retour sur investissement (ans)		
	Constantine	Alger	Ghardaïa
Gaz standard	0	0	0
Gaz sans réservoir	1.8	1.5	1.3

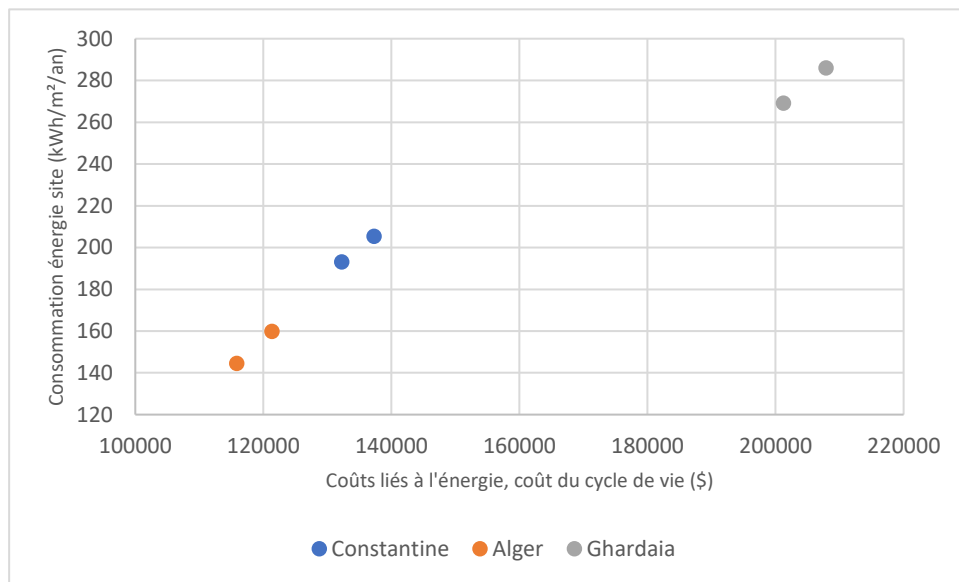


Figure 6.11 Effets des variations de chauffe-eau sur l'optimalité de la consommation énergétique et du cout

Source : (Auteur, 2023)

Dans les trois climats examinés, l'utilisation d'un chauffe-eau standard avec réservoir engendre une consommation énergétique plus élevée (Figure 6.11), avec des valeurs de 12,3 kWh/m²/an pour Constantine, 15,3 kWh/m²/an pour Alger et 16,8 kWh/m²/an pour Ghardaïa. De plus, ces systèmes entraînent des valeurs d'ERC et de LCC plus élevées, se chiffrant à 5 037 \$, 5 520 \$ et 6 606 \$ respectivement pour les climats de Constantine, Alger et Ghardaïa.

Ces constatations mettent en évidence que l'emploi de chauffe-eau à gaz sans réservoir s'avère être plus énergétiquement efficace, présentant un retour sur investissement très solide, ce qui en fait une option viable sur le plan économique.

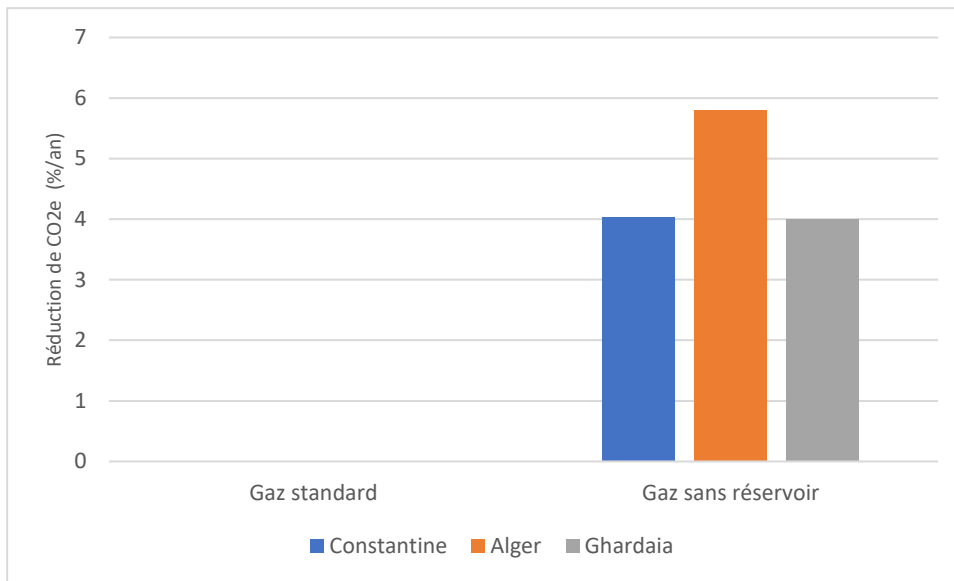


Figure 6.12 Effets des variations de chauffe-eau sur l'optimalité de la consommation énergétique et du cout

Source : (Auteur, 2023)

La transition du chauffe-eau à gaz avec réservoir vers le chauffe-eau à gaz sans réservoir conduit à une réduction des émissions de CO₂e dans tous les climats étudiés, à hauteur de 4 % pour Constantine et Ghardaïa, et de 5,8 % pour le climat d'Alger La (Figure 6.12). Ces résultats mettent en lumière le potentiel inhérent à l'adoption croissante de composants d'eau chaude plus énergétiquement efficaces, non seulement pour la réduction des émissions de CO₂e, mais également pour l'abaissement de la consommation énergétique.

1.3.1. Réseaux de distribution (tuyaux)

Les réseaux de distribution au sein des bâtiments revêtent généralement la fonction de canaliser et distribuer des fluides tels que l'eau, l'air ou le gaz. Ces canalisations, en tant qu'éléments constitutifs des systèmes de plomberie ou des systèmes de chauffage, ventilation et climatisation (CVC), sont fréquemment intégrées au sein des structures du bâtiment. Dans le contexte de la distribution d'eau, ces tuyauteries sont principalement associées aux équipements tels que les éviers, les douches et les toilettes. De manière similaire, dans le cadre des systèmes CVC, elles servent à la distribution de l'eau, qu'elle soit chaude ou froide, vers les différentes zones de l'édifice.

L'élaboration et la mise en place de ces réseaux de distribution jouent un rôle crucial dans la conception architecturale du bâtiment, influençant également la maintenance future de ces installations. Par ailleurs, il convient de noter que la qualité et le design de ces canalisations ont la capacité d'exercer un impact significatif sur l'efficacité énergétique globale de l'édifice.

Dans notre étude, deux alternatives de réseaux de distribution disponible en Algérie ainsi que leur retour sur investissement ont été examinées (Tableau 6.7).

Tableau 6.7 Variantes des réseaux de distribution et leurs retours sur investissement.

Source : (Auteur, 2023)

	Retour sur investissement (ans)		
	Constantine	Constantine	Constantine
Cuivre	0	0	0
PEX	0	0	0

Les résultats révèlent que la substitution du cuivre par le PEX en tant que matériau pour les tuyaux de distribution entraîne une économie substantielle de la consommation d'énergie, atteignant jusqu'à 12,3 kWh/m²/an pour Constantine, 15,3 kWh/m²/an pour Alger et 16,8 kWh/m²/an pour Ghardaïa. Parallèlement, une réduction des valeurs d'ERC et de LCC est constatée, avec des économies correspondantes de 5 037 \$, 5 519 \$ et 6 606 \$ pour les climats de Constantine, Alger et Ghardaïa respectivement (Figure 6.13).

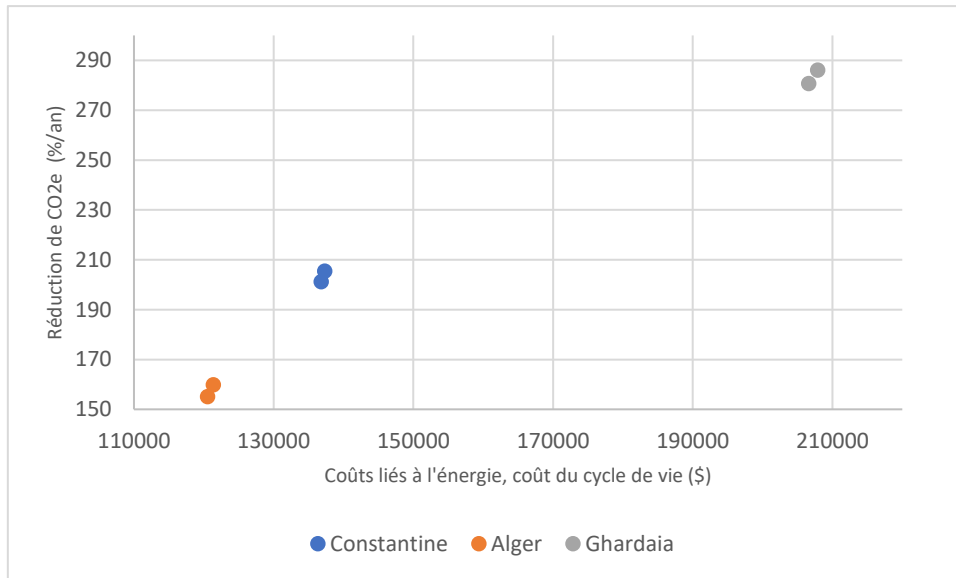


Figure 6.13 Effets des variations de tuyaux de distribution sur l'optimalité de la consommation énergétique et du coût

Source : (Auteur, 2023)

1.4. Equipements économes en énergie

Les équipements économiques en énergie sont les différentes technologies et systèmes couramment utilisés dans les bâtiments, mais qui permettent d'atteindre un niveau plus élevé d'efficacité énergétique et de réduire la consommation énergétique.

Dans notre étude, différentes alternatives d'équipements économes en énergie disponible en Algérie ainsi que leur retour sur investissement ont été examinées (Tableau

6.8). Ces équipements varient en fonction de leur efficacité énergétique, allant de la classe B à la classe A+++.

Tableau 6.8 Variantes des équipements économes en énergie et leurs retours sur investissement.

Source : (Auteur, 2023)

	Retour sur investissement (ans)		
	Constantine	Alger	Ghardaïa
Réfrigérateur			
A+++	9.5	82.1	9.5
A++	8.0	28.3	8.0
A+	6.7	8.9	6.7
A	10.2	4.1	10.2
Standard	0.0	0.0	0.0
Machine a lavé			
Standard	0.0	0.0	0.0
A+++	4.4	13.0	15.4
A++	3.9	8.8	20.6
A+	3.8	7.5	31.2
A	4.2	7.6	95.4
Cuisinière			
Gaz	0.0	0.0	0.0
Gaz (80% Usage)	0.0	0.0	0.0
Gaz (120% Usage)	0.0	0.0	0.0
Electrique	7.5	7.1	6.8
Electrique (80% Usage)	5.7	5.3	5.0
Electrique (120% Usage)	10.8	10.7	10.5
Electrique à induction	8.5	8.0	7.6

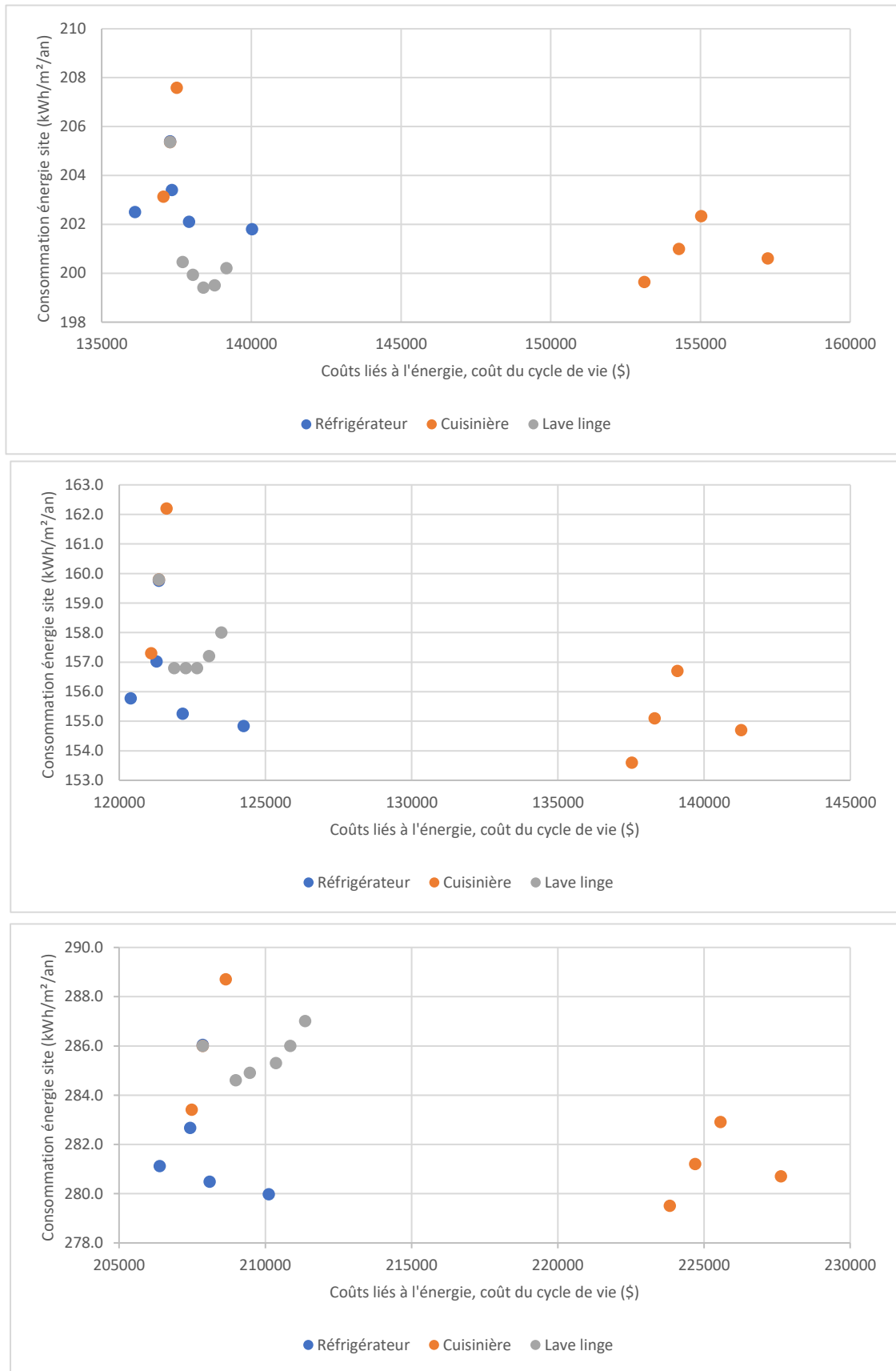


Figure 6.14 Effets des variations d'équipements énergétiquement efficaces sur l'optimalité de la consommation énergétique et du cout

Source : (Auteur, 2023)

bâtiment vers des équipements plus énergétiquement efficaces (Figure 6.14). À titre d'exemple, trois équipements ont été substitués par des modèles à plus grande efficacité énergétique. Les résultats démontrent que cette modification d'équipement vers des versions plus efficaces génère, dans l'ensemble des climats étudiés, des économies d'énergie substantielles, se situant entre 4 et 6 kWh/m²/an pour les réfrigérateurs, 5,3 et 4,8 kWh/m²/an pour les cuisinières, et 1,4 et 4,9 kWh/m²/an pour les lave-linges. Il est à noter que le climat

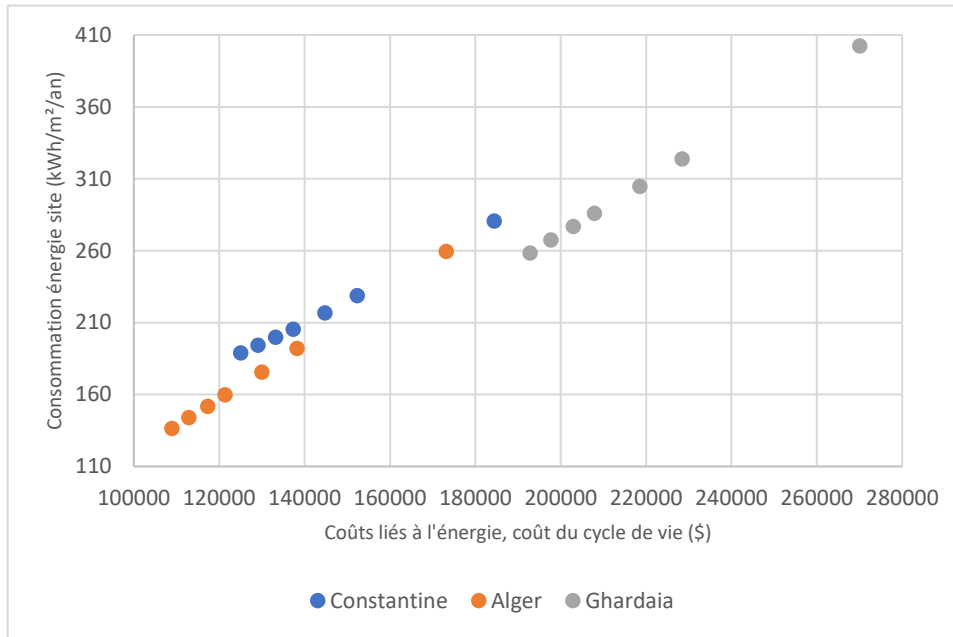


Figure 6.15 Effets des variations des autres équipements sur l'optimalité de la consommation énergétique et du cout

Source : (Auteur, 2023)

de Ghardaïa affiche les économies les plus significatives dans l'ensemble. Les résultats illustre l'effet de la modification des autres équipements sur la consommation totale d'énergie du site, ainsi que sur les paramètres ERC et LCC du bâtiment (Figure 6.15). Une seconde approche a été introduite, impliquant la variation de la consommation des autres équipements énergétiques du bâtiment. Cette fois-ci, cette variation a également pris en compte le comportement des utilisateurs, en modulant plusieurs facteurs multiplicateurs de l'énergie utilisée, allant d'un quart de l'utilisation normale jusqu'à quatre fois. Les résultats exposent de manière logique que plus les appareils sont utilisés avec une efficacité énergétique élevée, plus il est possible d'engendrer des réductions de consommation énergétique. Cette approche se traduit par une diminution de 16,5 kWh/m²/an pour le climat de Constantine, 23,4 kWh/m²/an pour le climat d'Alger et 27,5 kWh/m²/an pour le climat de Ghardaïa. En revanche, en doublant l'utilisation et l'efficacité des appareils, une perte respective de 11,4 %, 32,2 % et 12 % est enregistrée pour les climats étudiés.

1.4.1. Les taux et la charge d'utilisation des équipements

Les taux d'utilisation et la charge des différents équipements énergétiques au sein d'un bâtiment jouent un rôle primordial dans la réduction de la consommation énergétique et des émissions de gaz à effet de serre, notamment le CO₂ équivalent, au sein de l'environnement bâti.

Au cours de notre étude, divers taux d'utilisation des équipements ont été examinés. Ces taux englobent la plage de l'utilisation énergétique des bâtiments, s'étendant de 25 % à 400 % avec le retour sur investissement. Il convient de souligner que ces pourcentages peuvent varier d'un bâtiment à un autre, en fonction de la manière dont les occupants exploitent les installations du bâtiment (Tableau 6.9).

Tableau 6.9 Variantes des Taux d'utilisation des équipements et leurs retours sur investissement.
Source : (Auteur, 2023)

Taux d'utilisation des équipements	Retour sur investissement (ans)		
	Constantine	Alger	Ghardaïa
400 %	0	0	0
200 %	0	0	0
150 %	0	0	0
100 %	0	0	0
75 %	0	0	0
50 %	0	0	0
25 %	0	0	0

Les résultats de la simulation démontrent que la variation de ces stratégies peut jouer un rôle significatif dans la diminution de la consommation énergétique, avec des taux variants respectivement entre 16.5 %, 23.4 % et 27.5 %, pour le scénario d'utilisation à 25 %, dans les différents climats de Constantine, Alger et Ghardaïa. En revanche, une surutilisation des divers équipements, atteignant jusqu'à 400 %, pourrait entraîner une augmentation de cette consommation, atteignant 36.6 %, 62.4 % et 40.7 % pour les villes précitées (Figure 6.16).

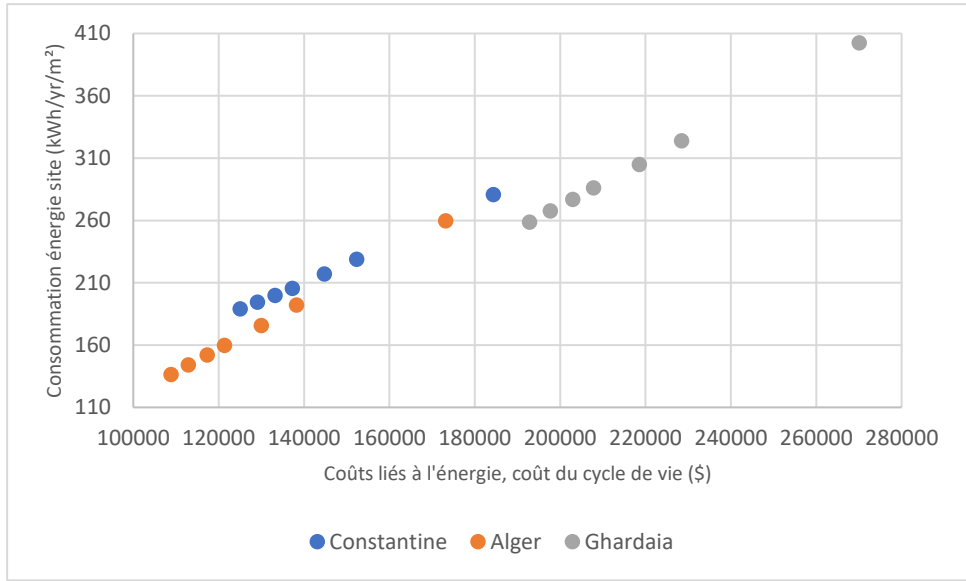


Figure 6.16 Effets des variations des taux d'utilisation des équipements sur l'optimalité de la consommation énergétique et du cout

Source : (Auteur, 2023)

2. Energie renouvelable : Panneaux photovoltaïque

2.1. Orientation et inclinaison

L'orientation et l'inclinaison des panneaux solaires jouent un rôle prépondérant dans leur efficacité. Une position et une inclinaison appropriées, basées sur le temps, la saison et la localisation, peuvent maximiser le potentiel de génération d'énergie solaire. Les études ont démontré qu'ajuster ces deux paramètres en tenant compte également des radiations solaire peut considérablement améliorer le rendement (Li et al., 2013) Cao et al., 2016) (Kapsalaki et al., 2012) (Oh et al., 2017) (Torcellini & Crawley, 2006) (Harkouss, 2018).

Dans notre étude, différentes orientations des panneaux solaires ont été examinées, caractérisées par trois orientations principales, à savoir Ouest, Sud et Est, suivies par plusieurs orientations secondaires. Il convient de noter que l'inclinaison des panneaux a été ajustée de manière incrémentielle, à chaque étape, en ajoutant 10°. Cette approche méthodologique vise à préserver la rigueur nécessaire pour déterminer les configurations optimales qui émergent de cette gamme de variations (Tableau 6.10).

Tableau 6.10 Variantes de l'orientation et inclinaison des panneaux solaire et leurs consommations énergétique, cout et réduction de CO2e

Source : (Auteur, 2023)

Orientation	Inclinaison	Consommation d'énergie du site (kWh/m²/an)	Coûts liés à l'énergie, coût du cycle de vie (\$)	Réduction de CO2e (%/an)
Ouest	0 degrés	223.30	143026.50	0.00
Ouest	30 degrés	223.41	143083.30	-0.09
Ouest	60 degrés	223.67	143213.60	-0.29
Sud-Ouest	0 degrés	223.30	143026.50	0.00
Sud-Ouest	30 degrés	223.20	142974.50	0.06
Sud-Ouest	60 degrés	223.39	143069.60	-0.08
Sud	10 degrés	223.19	142973.50	0.08
Sud	20 degrés	223.13	142941.20	0.13
Sud	30 degrés	223.10	142930.40	0.14
Sud	40 degrés	223.12	142939.20	0.13
Sud	50 degrés	223.17	142964.70	0.09
Sud	60 degrés	223.27	143009.80	0.01
Sud-Est	0 degrés	223.30	143026.50	0.00
Sud-Est	60 degrés	223.37	143066.60	-0.06
Est	0 degrés	223.30	143026.50	0.00
Est	60 degrés	223.65	143077.40	-0.08
Est	30 degrés	223.40	143201.90	-0.27

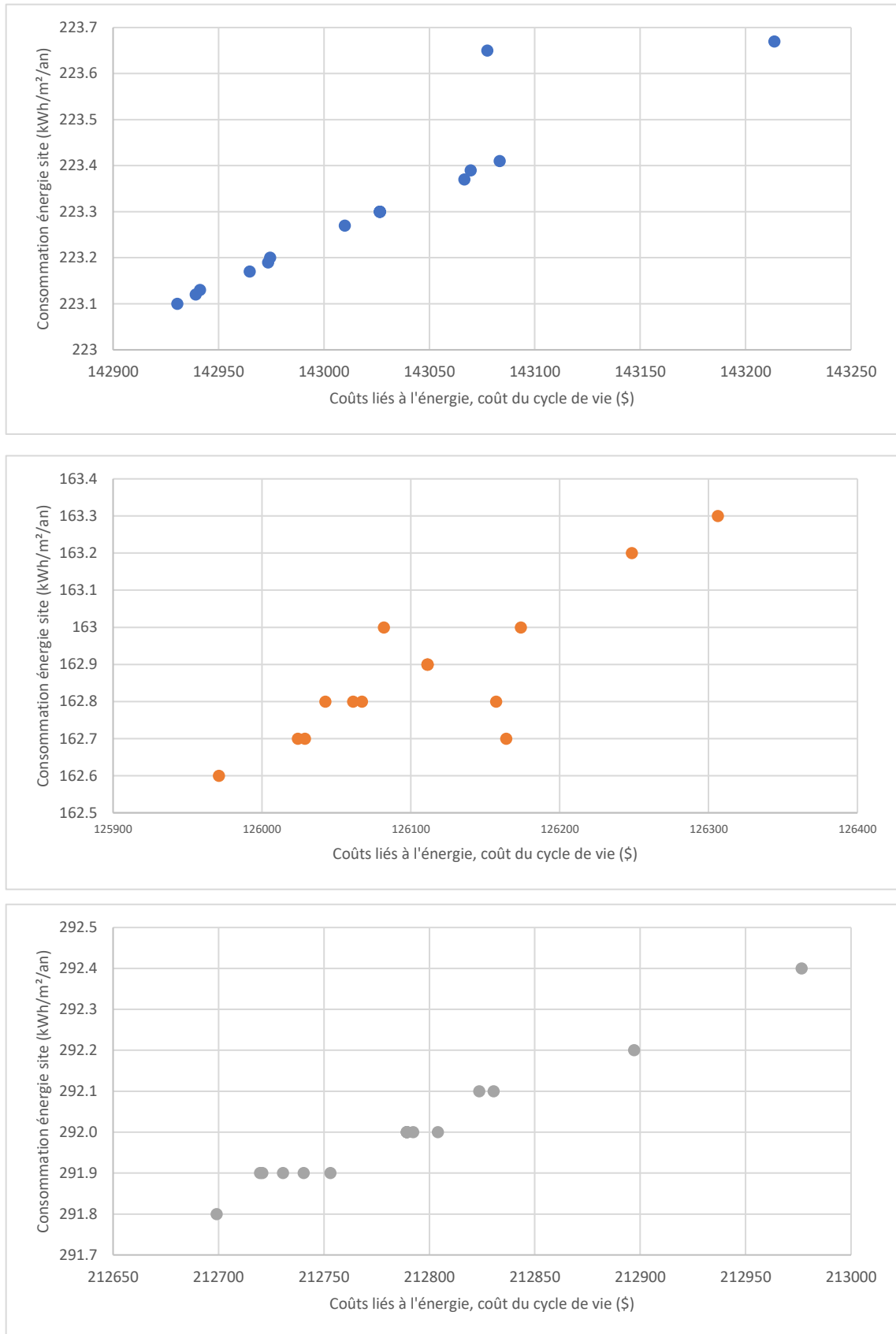


Figure 6.17 Effets des variations d'orientation et d'inclinaison des panneaux solaires sur l'optimalité de la consommation énergétique et du cout

Source : (Auteur, 2023)

Les données suivantes illustrent les variations d'orientation et d'inclinaison des

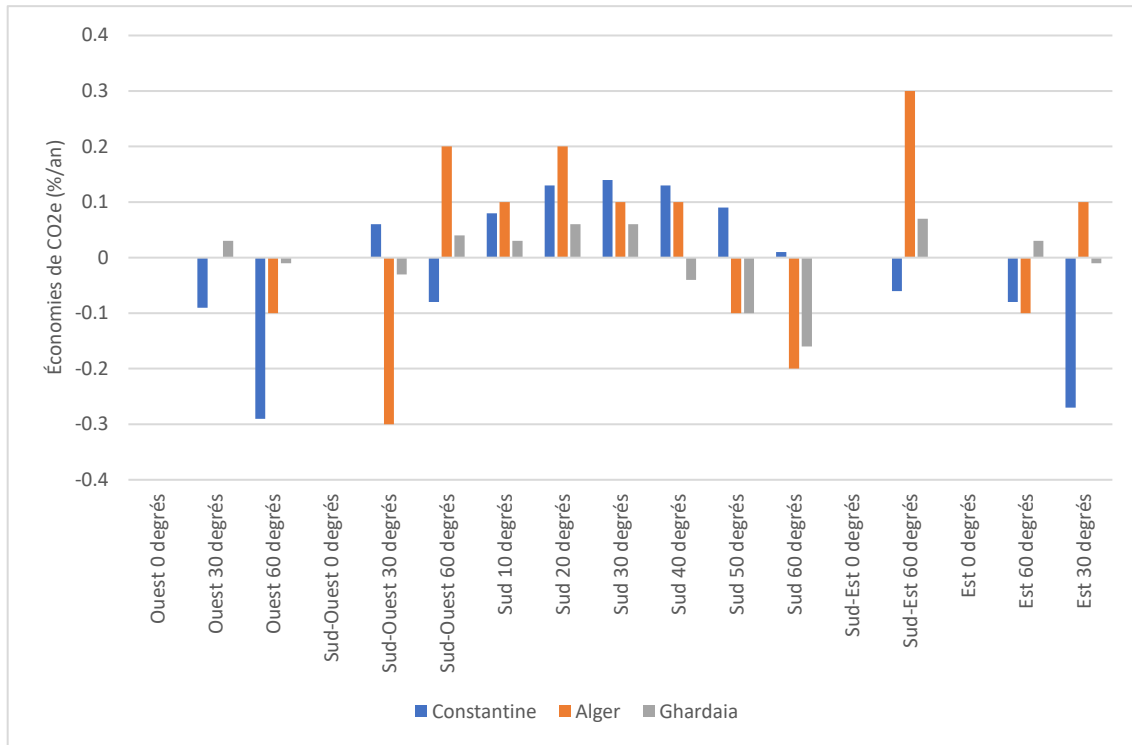


Figure 6.18 Effets des variations d’orientation et d’inclinaison des panneaux solaires sur les résultats des émissions de CO2e (%/an)

Source : (Auteur, 2023)

panneaux solaires a été conduite au moyen d'une simulation visant à évaluer les effets de ces changements sur la consommation énergétique du site, ainsi que sur les paramètres ERC et LCC, à l'aide d'un panneau solaire d'une puissance de 1 kW, dans les différents climats étudiés (Figure 6.17).

Les résultats révèlent que les diverses orientations et inclinaisons des panneaux solaires engendrent des valeurs distinctes. Une variation se dessine entre les différentes configurations, avec un écart d'environ 0,1 kWh/m²/an pour les divers climats étudiés, et un écart maximum atteignant 1 kWh/m²/an entre les configurations optimale et défavorable.

En ce qui concerne les paramètres ERC et LCC, il a été constaté que les changements d'orientation et d'inclinaison permettent des économies de l'ordre de 283 \$, 309 \$ et 277 \$ par kW de panneau solaire pour les climats de Constantine, Alger et Ghardaïa respectivement.

Les résultats dénotent que les variations d'orientation et d'angle engendrent des ajustements marginaux dans la réduction des émissions de CO2e, variant jusqu'à 0,3 % en tant que maximum pour les configurations les plus favorables, et -0,3 % pour les

configurations les moins favorables. Il est important de préciser que ces variations sont basées sur un unique panneau solaire d'une puissance de 1 kW (Figure 6.18).

En conclusion, à la suite de l'étude exhaustive considérant les contraintes telles que la réduction de la consommation énergétique du site, les paramètres ERC et LCC, ainsi que la réduction des émissions de CO₂e, il a été déterminé que l'orientation sud avec un angle d'inclinaison de 30° est optimale dans les trois climats. Cette configuration permet de générer les résultats les plus favorables pour les simulations ultérieures de dimensionnement.

2.2. Dimensionnement de la puissance

L'énergie générée par les panneaux solaires dépend de divers facteurs, tels que le dimensionnement de la puissance, l'efficacité énergétique et la quantité de soleil reçue. La puissance des panneaux solaires est généralement mesurée en watts (W) ou kilowatts (kW).

Dans notre étude, plusieurs variantes de puissances des panneaux solaires ont été examinées (Tableau 6.11).

Tableau 6.11 Variantes de la puissance des panneaux solaire et leurs retours sur investissement.

Source : (Auteur, 2023)

kW	Retour sur investissement (ans)		
	Constantine	Alger	Ghardaïa
0	0.0	0.0	0.0
1	31.2	41.2	39.6
3	29.2	39.7	114.7
6	29.2	38.6	74.3
9	28.0	36.9	53.3
12	26.8	35.4	45.4
15	25.6	33.8	40.6
18	24.4	32.3	37.2
21	23.2	30.6	34.3
24	22.0	28.9	31.8

Afin d'examiner en profondeur l'incidence de la modification des dimensions des panneaux solaires sur plusieurs paramètres clés, notamment la consommation énergétique, le retour sur investissement, les paramètres ERC et LCC, ainsi que la réduction des émissions de CO₂, nous avons choisi d'entreprendre une étude exhaustive. Cette étude a consisté à varier la capacité des panneaux solaires, s'échelonnant de 1 kW à 24 kW, tout en prenant en compte leurs répercussions sur les taux de retour sur investissement respectifs.

Tableau 6.12 Effets des variations de la puissance des panneaux solaire sur la consommation énergétique et la réduction de CO2e

Source : (Auteur, 2023)

k W	Constantine		Alger		Ghardaïa	
	Consommation énergie site (kWh/m ² /an ²)	Réduction de CO2e (%/an)	Consommation énergie site (kWh/m ² /an)	Réduction de CO2e (%/an)	Consommation énergie site (kWh/m ² /an)	Réduction de CO2e (%/an)
0	205.4	0.0	159.8	0.0	286.0	0.0
1	203.7	1.3	157.9	1.7	284.1	0.8
3	200.2	4.0	154.1	5.0	284.1	2.4
6	195.1	8.0	148.4	9.9	280.1	4.9
9	189.9	12.0	142.7	14.9	274.2	7.3
12	184.8	16.0	137.0	19.9	268.3	9.8
15	179.6	20.0	131.2	24.9	262.3	12.3
18	174.5	24.1	125.5	29.8	256.4	14.7
21	169.3	28.1	119.8	34.8	250.4	17.2
24	165.5	31.0	114.1	39.8	244.5	19.6

Les résultats éclairent le fait qu'une augmentation de la puissance des panneaux solaires se traduit par une réduction de la consommation énergétique du site, conjointement à une intensification de la réduction des émissions de CO2e. Cette diminution de la consommation énergétique peut atteindre 36,1 kWh/m²/an pour le climat de Constantine, 45,7 kWh/m²/an pour Alger, et 41,5 kWh/m²/an pour Ghardaïa, lorsqu'une puissance de 24 kW est mise en œuvre. De même, une réduction des émissions de CO2e allant jusqu'à 31 %, 39,8 % et 19,6 % est observée. Cette diminution conjointe de la consommation énergétique et des émissions de CO2e à l'aide de puissances plus élevées constitue un élément positif pour la transition vers la durabilité environnemental (Tableau 6.12).

En ce qui concerne le retour sur investissement, une tendance à la baisse est notée à mesure que la puissance des panneaux solaires augmente, ce constat s'appliquant dans tous les climats examinés. Parmi les trois climats, Constantine présente les taux de retour sur investissement les plus modestes, suivie d'Alger et de Ghardaïa, avec des périodes respectives de 22,0 ans, 28,9 ans et 31,8 ans. Cette tendance indique que les installations plus amples se révèlent économiquement plus viables.

Conclusion

Tout au long de ce chapitre, une exploration approfondie a été entreprise, abordant l'importance des diverses stratégies actives visant à améliorer l'efficacité énergétique des bâtiments. L'introduction de ces stratégies constitue une approche ciblée visant à optimiser les performances énergétiques des bâtiments. Les différentes sections ont examiné en détail les éléments constitutifs de ces stratégies, tels que les systèmes CVC, l'éclairage artificiel, la demande et la distribution d'eau chaude, ainsi que les équipements économes en énergie. Cette analyse a également examiné l'intégration de panneaux photovoltaïques en tant que source d'énergie renouvelable pouvant être intégrée aux bâtiments.

Tableau 6.13 Résultats optimaux découlant des différentes stratégies Active et EnR envisagées

Source : (Auteur, 2023)

Stratégies/climats	Réduction de l'énergie (%)			Réduction des émissions (%)			Retour sur investissement (ans)		
	Constantine	Alger	Ghardaïa	Constantine	Alger	Ghardaïa	Constantine	Alger	Ghardaïa
Stratégies Active									
Climatisation centrale	19.5	26.6	19.5	31.6	36.8	63.3	101.2	96.2	46.2
Climatisation simple	14.4	19.3	40.1	23.0	26.9	47.4	6.0	5.8	1.6
Pompe à chaleur	13.9	5.2	23.5	6.1	10.9	45.3	259.9	259.9	226.4
Chaudière	6.3	11.0	1.0	3.3	0.2	0.4	55.3	1646.6	274.4
Eclairage artificiel	3.0	5.5	3.5	6.0	7.9	0.0	0.0	0.0	4.3
Eau chaude sanitaire	6.0	9.5	5.9	4.0	5.8	4.0	1.8	1.5	1.5
Réseaux de distribution (tuyaux)	2.0	3.0	1.9	1.7	2.2	1.4	0.0	0.0	0.0
Equipements économes en énergie	25.7	21.1	13.0	21.4	26.5	16.9	13.9	89.7	24.9
Energie renouvelable (Solaire)									
Panneaux photovoltaïque 24 kW	19.4	28.6	14.5	31	39.8	19.6	22	28.9	31.8

Les résultats soulignent que chaque stratégie joue un rôle spécifique dans la réduction de la consommation d'énergie et l'atteinte d'un niveau spécifique d'efficacité énergétique.

L'analyse des stratégies actives dans le contexte climatique des villes de Constantine, Alger et Ghardaïa révèle des tendances significatives. La climatisation centrale et simple ainsi que les pompes à chaleur présentent des réductions substantielles de la consommation d'énergie et des émissions, mais nécessitent un investissement initial conséquent, avec des périodes de retour sur investissement relativement longues. En revanche, les chaudières, l'éclairage artificiel, l'eau chaude sanitaire et les réseaux de distribution (tuyaux) affichent des retours sur investissement plus courts, bien que leurs réductions soient moins marquées. Les équipements économes en énergie démontrent des réductions significatives, avec des retours sur investissement variables, soulignant l'importance d'une évaluation approfondie des coûts initiaux. En ce qui concerne les énergies renouvelables, les panneaux photovoltaïques de 24 kW offrent des réductions substantielles, bien que les retours sur investissement exigent une période considérable, indiquant un potentiel significatif mais nécessitant des investissements à long terme (Tableau 6.13).

L'analyse des résultats à démontrer qu'une conception réfléchie et une sélection stratégique de ces approches peuvent considérablement réduire la consommation d'énergie et les émissions de gaz à effet de serre. Il est évident qu'une adoption harmonieuse de ces mesures en accord avec le contexte et le climat du bâtiment peut contribuer de manière durable à atteindre l'objectif de net zéro énergie.

**CHAPITRE - VI - LE BATIMENT A
NET ZERO ÉNERGIE FACE AUX
SCENARIOS RCP : UN CHEMIN VERS
UNE ARCHITECTURE DURABLE ET
RESILIENTE**

Introduction

*« La plus grande menace qui pèse sur notre planète est
la conviction que quelqu'un d'autre la sauvera »*

— Robert Swan

L'ère contemporaine est marquée par une préoccupation croissante pour la durabilité environnementale et la nécessité de renforcer les systèmes urbains face aux impacts croissants du changement climatique. Dans ce contexte dynamique, le secteur du bâtiment et de la construction joue un rôle essentiel en intégrant de manière stratégique les innovations technologiques, les avancées méthodologiques et les paradigmes de conception pour tracer la voie vers un avenir durable. Ce chapitre présente le fruit d'une série de simulations diverses visant à intégrer les stratégies énergétiques actives, passives et renouvelables pour atteindre le concept de bâtiment a net zéro énergie, dans le cadre des différentes Trajectoires de Concentration Représentatives (RCP). En ce faisant, il dévoile une vue panoramique des trajectoires concevables qui conduisent à la réalisation d'une architecture résiliente et durable.

Au cœur de cette investigation se trouve une étude minutieuse de dimensions variées, englobant non seulement l'efficacité énergétique, mais aussi la viabilité économique et la durabilité holistique. Chaque section de ce chapitre est dédiée à fournir les éléments fondamentaux nécessaires pour une compréhension complète.

Le climat se profile comme une considération cruciale lors de la conception d'un projet a net zéro énergie. Il influe profondément sur les charges thermiques externes tout en offrant simultanément une source inestimable d'énergie gratuite. Cette ressource énergétique naturelle, disponible sous différentes formes et quantités dans tous les climats, souligne l'essence même d'un projet a net zéro énergie : s'harmoniser avec l'environnement, atténuer passivement les charges thermiques tout en exploitant l'énergie naturelle disponible du climat.

Ce chapitre débute en établissant d'abord les fondements du climat au moyen d'une exploration simplifiée des définitions, des caractéristiques et de l'analyse climatique. La compréhension des changements climatiques et de leurs projections futures, sous la forme de scénarios de concentration représentatifs (RCP), devient ainsi cruciale pour déterminer les voies futures du climat.

Par la suite, le chapitre plonge dans l'étude du cas d'étude au sein des trois climats étudiés - Constantine, Alger et Ghardaïa - en présentant les résultats des simulations dans les

circonstances actuelles et en les extrapolant dans divers scénarios RCP. Cette évaluation approfondie offre une appréciation nuancée des performances énergétiques et environnementales dans le contexte architectural algérien.

Les sections suivantes abordent l'intégration des stratégies passives, actives et des énergies renouvelables au sein des cas d'études situées dans les trois climats examinés. De plus, les analyses sont étendues pour englober divers scénarios RCP. Les résultats, exprimés à travers la consommation d'énergie, les émissions de CO₂e et les coûts, servent de repères pour identifier les avenues les plus prometteuses pour atteindre le concept de net zéro énergie.

Enfin, le chapitre conclut en synthétisant les principales conclusions tirées des diverses simulations menées dans les sections précédentes et en les intégrant dans le dernier cas visant à atteindre la net zéro énergie. De plus, il simule également son développement futur avec les scénarios RCP, ce qui ouvre des perspectives sur la manière dont les avancées technologiques et les stratégies de conception peuvent s'intégrer pour façonner un bâtiment durable et résilient.

1. Fondements Climatiques

1.1. Définition et Caractérisation du Climat

La perspicace observation de Mark Twain, inscrite dans la phrase célèbre "Le climat est ce que nous attendons ; le temps est ce que nous obtenons", expose avec justesse la distinction essentielle entre le climat et les conditions météorologiques quotidiennes.

Le climat se définit généralement comme l'ensemble des conditions météorologiques prédominantes d'une région, observées sur une période relativement longue. Plus rigoureusement, il s'agit de la description statistique des grandeurs significatives, exprimée en termes de moyennes et de variabilités, englobant des échelles temporelles allant de quelques mois à des échelles temporelles extrêmement longues, telles que des milliers ou des millions d'années. Selon les critères de l'Organisation météorologique mondiale, la fenêtre temporelle habituellement retenue pour le calcul de ces moyennes s'étend sur une durée de 30 ans (IPCC, 2018) (Werndl, 2016). Le climat est directement influencé par la localisation géographique (latitude et altitude) d'un lieu. Les caractéristiques géographiques telles que la topographie, les masses d'eau et en particulier les océans, exercent toutes un effet dynamique sur le climat (Mashwani, 2020). Les paramètres de surface tels que la température, les précipitations et les schémas de vent sont souvent considérés. Dans un sens plus large, le climat représente l'état global du système climatique (IPCC, 2018) (Spiridonov & Curic, 2020).

Un système de classification climatique se révèle primordial pour appréhender le climat dans un contexte global (Spiridonov & Curic, 2020). Parmi les systèmes de classification, celui élaboré par Köppen reste prédominant. Initialement publié en 1918, ce système a évolué au fil du temps tout en maintenant son utilité actuelle. Il subdivise le climat mondial en cinq classes principales (identifiées par les lettres majuscules de A à E), chacune étant à son tour subdivisée en types et sous-types (au moyen de lettres minuscules) (Figure 6.1). Ces cinq classes principales se déclinent comme suit :

- A : Tropical
- B : Aride
- C : Tempéré
- D : Froid
- E : Polaire

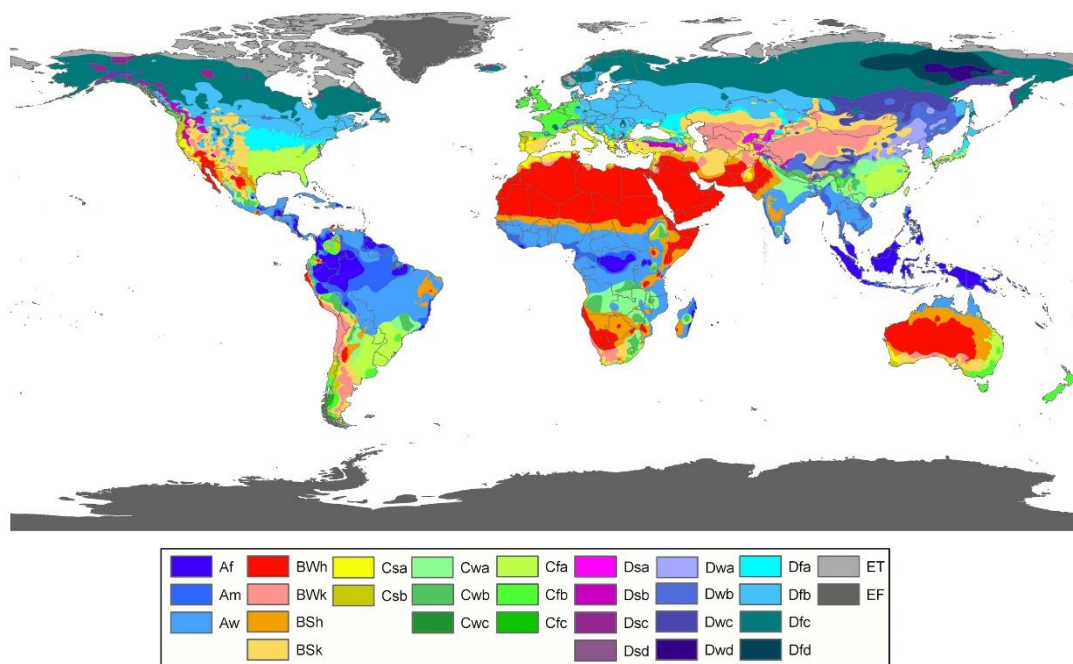


Figure 7.1 Carte de classification de climat par Koppen
 Source : (koeppen-geiger.vu-wien.ac.a, 2022)

L'attribution de la zone climatique appropriée à un projet sert de point de départ essentiel pour la planification d'un bâtiment à consommation nette d'énergie, en tenant compte des exigences climatiques locales. Une compréhension approfondie de la zone climatique et de ses traits distinctifs peut faciliter l'identification de solutions architecturales adaptées à d'autres endroits partageant des conditions climatiques similaires. Les définitions du climat et des conditions météorologiques impliquent la prise en compte de multiples paramètres. Ces paramètres se transforment en ensembles de données météorologiques, utilisés ultérieurement pour la modélisation énergétique. Ces données météorologiques, issues des stations disséminées à travers le monde, forment la base d'études climatiques et de modèles énergétiques. Notamment, les stations météorologiques installées dans les aéroports sont fréquemment exploitées. Dans bien des cas, il est légitime de postuler que les conditions météorologiques de la station la plus proche sont représentatives de celles du site du projet. L'utilisation de la station météorologique la plus proche disponible ou l'extrapolation à partir des stations voisines se révèlent des options valables (Hootman, 2013) (Werndl, 2016).

Beck et al ont détaillé la carte de chaque pays afin de donner un aperçu de la classification climatique algérienne selon les systèmes Köppen et Geiger (Figure 6.2) :

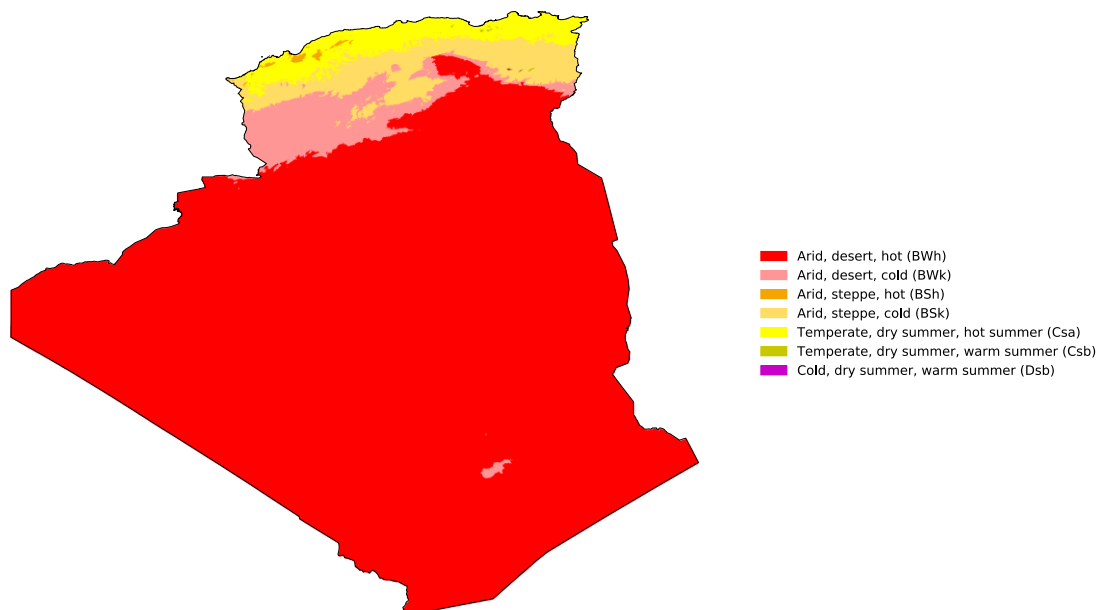


Figure 7.2 Carte de classification climatique Algérienne de Köppen et Geiger

Source : (Beck et al., 2018)

La classification thermique est appliquée aux communes algériennes dans le présent DTR (Figure 6.3)., se subdivisant en plusieurs zones climatiques (Ministère de l’Habitat, 1997) (Ministère de l’Habitat, 2016) :

- Zone climatique A : Englobe le littoral et les plaines côtières au nord.
- Zone climatique B : Concerne la partie septentrionale des hauts plateaux intérieurs, avec deux sous-zones distinctes, B1 pour la vallée du Chlef, et B2 pour la région de Guelma.
- Zone climatique C : Couvre les hauts plateaux intérieurs.
- Zone climatique D : Inclut diverses régions du nord comme Saoura et Chott el Hodna.
- Zone climatique E : Englobe les régions septentrionales, orientales et sud-occidentales, ainsi que l’extrême sud du Sahara. Une subdivision supplémentaire, E1, comprend le Hoggar et le Tassili.
- Zone climatique F : Correspond à la région de Tanezrouft.

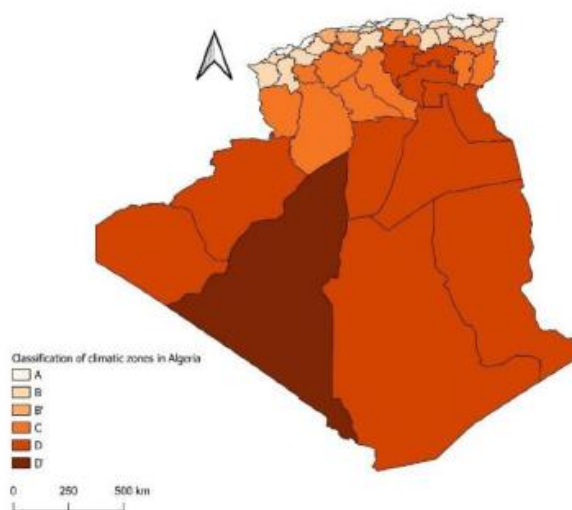


Figure 7.3 La carte climatique algérienne, conforme à l'ancien DTR 1998

Source : (Afaifia et al., 2021).

1.2. Analyse climatique

Comprendre le climat local d'un projet constitue l'une des étapes initiales essentielles pour appréhender les problématiques énergétiques spécifiques. En effet, le climat joue un rôle déterminant dans la détermination des charges de chauffage et de refroidissement de l'enveloppe d'un bâtiment, qui représente une part significative de sa consommation énergétique globale. Cette influence est particulièrement prononcée dans les climats rigoureux. Par conséquent, la compréhension et l'analyse approfondies du climat local sont indispensables pour aspirer à atteindre le niveau d'efficacité énergétique net zéro dans la conception d'un bâtiment.

L'analyse climatique se déploie en plusieurs étapes. Tout d'abord, elle consiste à acquérir une connaissance globale des paramètres climatiques spécifiques au site du projet, en se basant sur des données météorologiques. Cette démarche permet ensuite d'effectuer une évaluation approfondie du climat local et de l'intégrer dans l'analyse du projet en lui-même. À partir de ces informations, des stratégies de conception passive et d'utilisation d'énergies renouvelables peuvent être élaborées et testées. La corrélation entre le climat et le bâtiment revêt une importance capitale lors de la planification de bâtiments visant à atteindre la neutralité énergétique nette, car elle constitue l'un des moyens les plus efficaces pour réduire les besoins énergétiques des constructions. L'analyse climatique requiert l'utilisation

de logiciels de calcul climatique, englobant une gamme variée de paramètres. Voici quelques exemples de logiciels qui permettent de mener à bien cette analyse :

- **WeatherTool** : est un logiciel conçu pour le traitement et l'analyse de données climatiques à diverses fins. Ce type de logiciel offre une assistance précieuse aux chercheurs, ingénieurs et concepteurs en leur permettant d'accéder et de manipuler aisément les données climatiques. Cette facilité d'accès aux informations climatiques facilite grandement les différentes étapes d'analyse climatique.
- **Meteonorm** : est un logiciel de pointe qui fournit des données météorologiques complètes, englobant des paramètres tels que la température, la pluviométrie, la vitesse du vent, et bien d'autres encore. Ce logiciel est couramment utilisé lors de la conception de bâtiments afin d'estimer le potentiel des énergies renouvelables et de développer diverses stratégies passives.
- **Climate Consultant** : est un outil d'analyse et de visualisation qui permet d'explorer les données climatiques et de comprendre leur impact sur la conception des bâtiments. Il offre aux architectes et concepteurs la possibilité d'examiner en détail l'influence des conditions climatiques sur les performances des bâtiments. En fournissant diverses solutions et stratégies passives adaptées à des contextes climatiques spécifiques, ce logiciel facilite l'amélioration des conceptions architecturales.

1.3. Changement climatique

Le changement climatique se définit comme une altération de l'état climatique, pouvant être détectée par des altérations statistiquement significatives au niveau des propriétés moyennes et/ou de leur variabilité sur une période de temps prolongée, typiquement de l'ordre de plusieurs décennies ou davantage. Ce phénomène peut résulter de processus internes inhérents à la nature ou être induit par des agents externes de contrainte tels que les cycles solaires, les éruptions volcaniques et les changements anthropiques persistants dans la composition atmosphérique ou l'utilisation des terres (Spiridonov & Curic, 2020)(Werndl, 2016). Au sein du premier article de la convention cadre sur les changements climatiques (CCNUCC), le changement climatique est défini comme "une transformation du climat attribuée directement ou indirectement à l'activité humaine, qui altère la composition de l'atmosphère mondiale et qui s'ajoute à la variabilité climatique naturelle observée sur des périodes comparables". Cette déclaration établit donc une distinction entre les transformations climatiques provoquées par l'activité humaine, lesquelles influent sur la

composition de l'atmosphère, et la variabilité climatique inhérente à des causes naturelles (IPCC, 2018).

1.4. Prévision et projection climatique

L'analyse des implications du changement climatique sur les données météorologiques futures et son rétro-impact sur la consommation énergétique des bâtiments revêt une importance grandissante. En outre, étant donné que les bâtiments à NZE sont conçus pour avoir une durée de vie prolongée, ils seront continuellement exposés aux réalités changeantes du climat tout au long de leur existence. Pour mieux appréhender cette dynamique, il est essentiel de faire la distinction entre les prévisions climatiques, qui représentent une tentative d'estimation de l'évolution effective du climat dans le futur, et les projections climatiques, qui décrivent la réponse simulée du système climatique à des scénarios d'émissions ou de concentrations futures de gaz à effet de serre et d'aérosols. Ces projections sont généralement élaborées au moyen de modèles climatiques et diffèrent des prévisions en ce qu'elles dépendent du scénario d'émission, de concentration ou de forçage radiatif choisi (Spiridonov & Curic, 2020) (IPCC, 2018).

1.4.1. Fondements des projections

Les émissions de dioxyde de carbone (CO₂) revêtent un rôle cumulatif de première importance dans le réchauffement global de la surface terrestre tout au long du XXI^e siècle et au-delà. Les prévisions des émissions de gaz à effet de serre manifestent une variation substantielle, influencée par les orientations socio-économiques et les politiques climatiques adoptées. En exploitant ces prévisions, le cinquième rapport d'évaluation (AR5) du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC) a instauré une approche novatrice pour la conception de scénarios prospectifs. Ces scénarios, dénommés "voies de concentration représentatives", englobent un spectre étendu de trajectoires de forçage radiatif (RCP) envisageables. Les RCP, établis sur la base de modèles climatiques, intègrent des données découlant de scénarios d'émissions de gaz à effet de serre et de polluants atmosphériques, ainsi que des modèles détaillant les évolutions dans l'utilisation des terres, dans le but de générer des projections relatives aux modifications climatiques. (Werndl, 2016) (Spiridonov & Curic, 2020) (Hootman, 2013) (Jubb et al., 2013) (IPCC, 2018).

1.4.2. Voies de concentration représentatives 'RCP'

Les effets du changement climatique sur l'environnement et la société dépendront de la réaction du système terrestre ainsi que des réponses de l'homme en termes de technologie,

d'économie, de mode de vie et de politique. Étant donné l'incertitude entourant ces réponses, des scénarios futurs sont employés pour étudier les conséquences de diverses options (Spiridonov & Curic, 2020).

Les Trajectoires de Concentration Représentatives (RCP) ont été conçues pour servir de fondement aux expériences de modélisation de la communauté climatique. Fruit d'une collaboration entre les modèles d'évaluation intégrée, les modèles climatiques, les modèles d'écosystème et les experts en sciences sociales abordant les émissions, l'économie, la politique, la vulnérabilité et les impacts climatiques Les RCP proposent quatre voies distinctes pour les émissions de gaz à effet de serre (GES), les concentrations atmosphériques, les émissions de polluants atmosphériques et l'utilisation des terres au XXI^e siècle. Les RCP intègrent les modèles d'évaluation intégrée (MEI) dans diverses simulations de modèles climatiques pour projeter leurs effets sur le système climatique, contribuant ainsi à l'évaluation des impacts et de l'adaptation. Le forçage radiatif projeté jusqu'à la fin du XXI^e siècle caractérise ces trajectoires, quantifiant l'énergie thermique supplémentaire retenue par la basse atmosphère due aux gaz à effet de serre additionnels, mesurée en watts par mètre carré (W/m^2) (Figure 6.4)(Jubb et al., 2013).

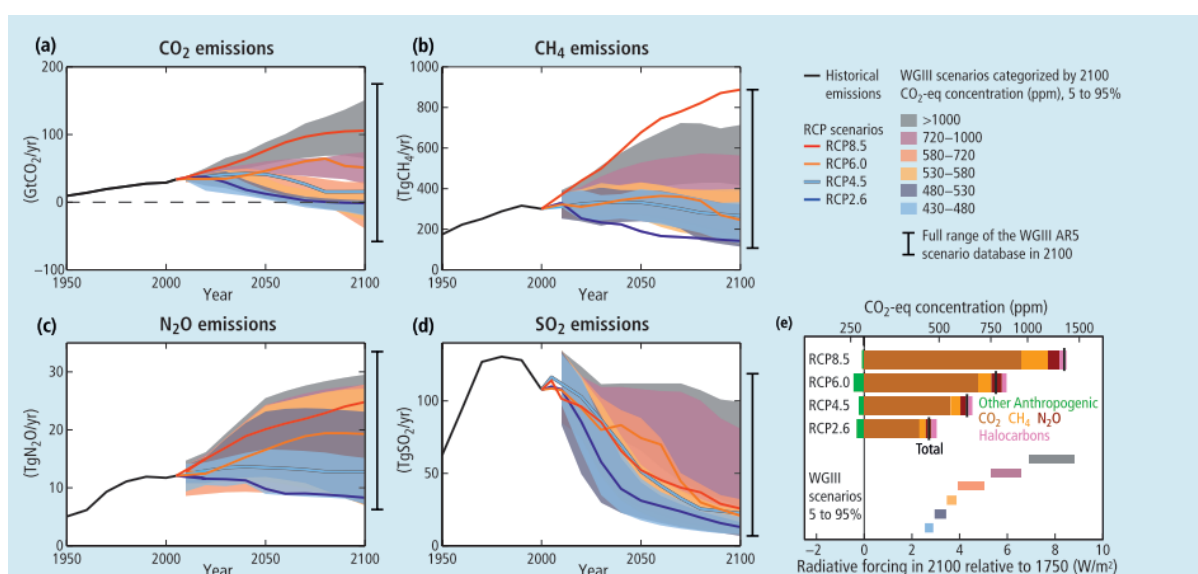


Figure 7.4 Les scénarios RCP (trajectoire du forçage radiatif jusqu'à l'horizon 2100)

Source : (IPCC, 2014)

Les RCP englobent un scénario d'atténuation rigoureuse (RCP2.6), deux scénarios intermédiaires (RCP4.5 et RCP6.0), et un scénario à émissions de GES très élevées (RCP8.5) (Tableau 7.1).

Tableau 7.1 Forçages radiatifs (W/m²) des RCP et leurs équivalents CO₂e atmosphérique

Source : (IPCC, 2018)

Forçage radiatif (W/m ²)	Équivalent CO ₂ e atmosphérique (Parties par million)	Lorsque
8.5	>1370	D'ici à 2100, mais en augmentation
6	850	Stabilisation après 2100
4.5	650	Stabilisation après 2100
2.6	490	Pic avant 2100 puis déclin

Les trajectoires allant de RCP6.0 à RCP8.5 sont issues de scénarios de référence ne supposant aucun effort supplémentaire pour réduire les émissions. Le RCP2.6 vise à limiter le réchauffement climatique à moins de 2°C au-dessus des niveaux préindustriels. À noter que ces scénarios futurs ne prennent pas en compte les changements potentiels du forçage naturel, tels que les éruptions volcaniques (IPCC, 2018) (Tableau 7.2).

Tableau 7.2 Projection de l'évolution de la température moyenne à la surface du globe et de l'élévation moyenne du niveau de la mer au milieu et à la fin du XXI^e siècle

Source : (IPCC, 2014)

	Scénario	2046-2065		2081-2100	
		Moyenne	Fourchette probable	Moyenne	Fourchette probable
Changement de la température moyenne de surface (C°)	RCP2.6	1.0	0.4 to 1.6	1.0	0.3 to 1.7
	RCP4.5	1.4	0.9 to 2.0	1.8	1.1 to 2.6
	RCP6.0	1.3	0.8 to 1.8	2.2	1.4 to 3.1
	RCP8.5	2.0	1.4 to 2.6	3.7	2.6 to 4.8
Élévation moyenne du niveau de la mer (m)	RCP2.6	0.24	0.17 to 0.32	0.40	0.26 to 0.55
	RCP4.5	0.26	0.19 to 0.33	0.47	0.32 to 0.63
	RCP6.0	0.25	0.18 to 0.32	0.48	0.33 to 0.63
	RCP8.5	0.30	0.22 to 0.38	0.63	0.45 to 0.82

Les nouveaux scénarios apportent des avantages significatifs à la communauté de chercheurs en climatologie sous plusieurs aspects, ils :

- Fournissent des données plus détaillées et normalisées sur les concentrations de gaz à effet de serre, les températures, les précipitations et d'autres paramètres climatiques, ce qui renforce la qualité des entrées pour les modèles climatiques.

- Approfondissent l'étude du rôle de l'adaptation et encouragent une intégration accrue de la construction de scénarios au sein des diverses disciplines participant à la recherche climatique.
- Promeuvent un partage plus fluide des informations entre les scientifiques.

2. Simulation du cas d'étude avec RCP

Afin de mieux appréhender et analyser les résultats obtenus, il est impératif de bien saisir les différentes variantes examinées dans le cadre du cas d'étude. Les tableaux présentent les résultats issus de la simulation de l'étude de cas en utilisant différentes séries de données climatiques. Ces données climatiques englobent diverses itérations des Trajectoires Concentrées Représentatives (RCP), allant de 2.6 à 8.5, chacune s'étendant sur des intervalles de 50 ans à partir de la date actuelle. Les RCP agissent en tant que scénarios au sein de la modélisation climatique, englobant des degrés distincts de concentrations de gaz à effet de serre dans l'atmosphère.

2.1. Cas du climat de Constantine

Pour le climat de Constantine, l'ensemble des données démontre de façon constante que la construction standard se traduira par une consommation énergétique accrue, pouvant atteindre 27.6% dans le scénario le plus défavorable, correspondant à une augmentation d'environ 57 kWh/m²/an. Cette augmentation ne se limite pas à la consommation énergétique, elle s'étend également aux coûts du cycle de vie (LCC), au Coût lié à l'énergie (ERC) et aux émissions de gaz à effet de serre (CO₂e). Dans le meilleur des cas, l'ERC ; LCC augmentent de 4380 \$, tandis que dans le pire des cas, ils connaissent une augmentation considérable de 58760 \$. De même, l'indice d'efficacité énergétique augmente de près de 67% dans le scénario le plus critique, atteignant 26% dans le pire des cas (Tableau 7.3).

Tableau 7.3 Résultat des simulations du cas d'étude du climat de Constantine avec les différents RCP.

Source : (Auteur, 2023)

	Économies d'énergie (%/an)	ERC; LCC (\$)	Consommation d'énergie (kWh/an)	Consommation d'énergie (kWh/m ² /an)	Réduction de CO ₂ e (%/an)
Cas d'étude	0.0%	137037.5	174553.1	205.4	0%
RCP 2.6 en 2050	-0.3%	141416.5	175112.9	206	-10%
RCP 2.6 en 2100	-9.5%	142652.2	177258.2	208.5	-10%
RCP 4.5 en 2050	-11.5%	144062.2	176085.9	207.2	-12%
RCP 4.5 en 2100	-24.2%	157431.2	184875.1	217.5	-26%
RCP 8.5 en 2050	-15.8%	148970.8	178723.5	210.3	-17%
RCP 8.5 en 2100	-27.6%	195798.6	223129.7	262.5	-26%

2.2. Cas du climat d'Alger

Pour le climat d'Alger, les résultats indiquent une tendance nettement plus prononcée en termes de consommation énergétique selon les divers scénarios RCP. Dans le scénario le plus favorable, une augmentation de 22% est observée pour les RCP 2.6 en 2100 et 4.5 en 2050. Cependant, cette tendance à la hausse se maintient, atteignant plus de 51% de consommation dans les cas les plus extrêmes. Cela s'accompagne d'une différence significative de 68645 \$ en ce qui concerne l'ERC et l'LCC. Cependant, le point le plus préoccupant réside dans la croissance alarmante des émissions de gaz à effet de serre, pouvant atteindre jusqu'à 80% (Tableau 7.4).

Tableau 7.4 Résultat des simulations du cas d'étude du climat d'Alger avec les différents RCP.

Source : (Auteur, 2023)

	Économies d'énergie (%/an)	ERC; LCC (\$)	Consommation d'énergie (kWh/an)	Consommation d'énergie (kWh/m ² /an)	Réduction de CO ₂ e (%/an)
Cas d'étude	0%	120920.2	135788.6	159.8	0%
RCP 2.6 en 2050	-23%	151094.2	167378.7	196.9	-30%
RCP 2.6 en 2100	-22%	149158.5	165465.0	194.7	-20%
RCP 4.5 en 2050	-22%	149887.3	165746.3	195.0	-30%
RCP 4.5 en 2100	-28%	163274.8	173943.5	204.6	-40%
RCP 8.5 en 2050	-26%	155715.1	171074.4	201.3	-30%
RCP 8.5 en 2100	-51%	189565.9	205510.2	241.8	-80%

2.3. Cas du climat de Ghardaïa

Pour le climat de Ghardaïa, les scénarios RCP 2.6 démontrent des résultats encourageants, parvenant même à réduire la consommation énergétique d'environ 6% d'ici à l'année 2050. Cependant, les taux d'amélioration sont plus modestes pour les scénarios RCP 4.5. Ce qui suscite des inquiétudes est la tendance observée dans les scénarios RCP 8.5, surtout pour l'année 2100. Les résultats indiquent une augmentation potentielle de la consommation énergétique de plus de 43% et une élévation des émissions de gaz à effet de serre de jusqu'à 56% (Tableau 7.5).

Tableau 7.5 Résultat des simulations du cas d'étude du climat de Ghardaïa avec les différents RCP.

Source : (Auteur, 2023)

	Économies d'énergie (%/an)	ERC; LCC (\$)	Consommation d'énergie (kWh/an)	Consommation d'énergie (kWh/m ² /an)	Réduction de CO ₂ e (%/an)
Cas d'étude	0%	207424.1	243131.8	286.0	0%
RCP 2.6 en 2050	6%	195348.4	228583.7	268.9	6%
RCP 2.6 en 2100	-2%	206331.5	246874.3	290.4	-2%
RCP 4.5 en 2050	-2%	214471.5	246874.3	290.4	-6%
RCP 4.5 en 2100	-17%	235599.4	283490.6	333.5	-22%
RCP 8.5 en 2050	-13%	230148.5	275146.9	323.7	-17%
RCP 8.5 en 2100	-43%	285608.9	347652.6	409.0	-56%

3. Intégration des stratégies passives avec différents RCP

Les résultats suivants illustrent l'efficacité de l'utilisation de stratégies passives et de leurs différentes variations en fonction des Trajectoires de Concentration Représentatives (RCP), des climats et des différentes périodes temporelles. L'accent sera mis sur l'effet de ces stratégies sur la consommation énergétique du site, le coût lié à l'énergie (ERC), le coût du cycle de vie (LCC) et les émissions de CO₂e.

3.1. Cas du climat de Constantine

Pour le climat de Constantine, le premier scénario concerne l'utilisation des stratégies passives dans le contexte actuel, ce qui se traduit par une économie de 15% en termes de consommation énergétique par rapport au cas d'étude de référence. Toutes les variantes d'RCP examinées entraînent une économie d'énergie, à l'exception du RCP 8.5 en 2100, qui subira une perte d'environ -8%, correspondant à une réduction de 17.4 kWh/m²/an. La même tendance est observée pour les ERC ; LCC, où toutes les trajectoires RCP induisent une réduction des coûts, à l'exception du RCP 8.5 en 2100 qui présente une augmentation de 14797 \$. En ce qui concerne la réduction des émissions, toutes les situations contribuent à diminuer les émissions de CO₂, se situant généralement autour de la réduction des émissions uniquement (Tableau 7.6).

CHAPITRE - VI - LE BATIMENT A NET ZERO ÉNERGIE FACE AUX SCENARIOS RCP : UN
CHEMIN VERS UNE ARCHITECTURE DURABLE ET RESILIENTE

Tableau 7.6 Résultat des simulations du cas d'étude avec les cas optimaux des stratégies passive du climat de Constantine avec les différents RCP.

Source : (Auteur, 2023)

	Économies d'énergie (%/an)	ERC; LCC (\$)	Consommation d'énergie (kWh/an)	Consommation d'énergie (kWh/m ² /an)	Réduction de CO2e (%/an)
Cas d'étude	0%	137037.5	174553.1	205.4	0%
Stratégies passives	15%	121310.0	148458.1	174.7	21%
RCP 2.6 en 2050	16%	123935.7	145905.4	171.7	23%
RCP 2.6 en 2100	16%	125156.7	147268.2	173.3	23%
RCP 4.5 en 2050	15%	126626.6	147502.7	173.5	23%
RCP 4.5 en 2100	13%	136977.1	152590.4	179.5	23%
RCP 8.5 en 2050	15%	130164.7	149094.0	175.4	23%
RCP 8.5 en 2100	-8%	174484.9	189350.3	222.8	18%

3.2. Cas du climat d'Alger

Pour le climat d'Alger, les variations énergétiques entre les différents RCP sont presque identiques, ce qui indique que les changements météorologiques n'ont pas eu un impact considérable sur la consommation énergétique du bâtiment lors de l'utilisation des stratégies passives. Cependant, une exception est observée dans le cas du RCP 8.5 en 2100, où l'intégration des stratégies passives entraîne une baisse notable de la réduction de la consommation énergétique, atteignant jusqu'à 17%. En ce qui concerne l'ERC ;LCC, on constate une augmentation dans tous les scénarios RCP par rapport au premier cas passif et au cas d'étude de référence, ce dernier permettant une économie d'environ 21370 \$. En ce qui concerne la réduction des émissions de CO2e, toutes les situations impliquant l'utilisation de stratégies passives conduisent à une réduction, avec une moyenne d'environ 29% (Tableau 7.7).

Tableau 7.7 Résultat des simulations du cas d'étude avec les cas optimaux des stratégies passive du climat d'Alger avec les différents RCP.

Source : (Auteur, 2023)

	Économies d'énergie (%/an)	ERC; LCC (\$)	Consommation d'énergie (kWh/an)	Consommation d'énergie (kWh/m ² /an)	Réduction de CO2e (%/an)
Cas d'étude	0%	120920.2	135788.6	159.8	0%
Stratégies passives	22%	99549.3	105479.2	124.1	32%
RCP 2.6 en 2050	23%	125552.4	104031.4	122.4	29%
RCP 2.6 en 2100	25%	123376.1	102363.9	120.4	29%
RCP 4.5 en 2050	24%	123792.0	102970.5	121.1	29%
RCP 4.5 en 2100	22%	134381.6	105268.2	123.8	30%
RCP 8.5 en 2050	22%	129023.3	105681.4	124.3	29%
RCP 8.5 en 2100	05%	156247.1	128810.6	151.5	28%

3.3. Cas du climat de Ghardaïa

Pour le cas de Ghardaïa, une augmentation significative est observée dans la réduction de la consommation énergétique par rapport aux autres climats, atteignant jusqu'à 39% dans le scénario initial, et maintenant une réduction de 25% même dans le pire des cas, associé au RCP 8.5 en 2100. Cette tendance se retrouve également pour la réduction des émissions de CO₂, avec une moyenne de 42%, et une diminution de 35217 \$ pour le pire scénario. Les résultats issus des simulations confirment l'efficacité des stratégies passives, tout en soulignant la dépendance à l'égard des différents scénarios RCP, des climats et des périodes temporelles. Dans les cas examinés, les stratégies passives affichent en grande majorité une économie énergétique positive, avec une notable réduction des émissions de CO₂e par rapport au cas d'étude. Elles tendent également à générer un coût ERC ; LCC supérieur à celui du cas d'étude, ce qui suggère qu'un investissement additionnel pourrait être nécessaire pour certaines de ces stratégies. Les résultats mettent également en évidence l'importance des études comparant les effets à court terme et à long terme lors des simulations énergétiques. Cela démontre quelles stratégies passives peuvent maintenir leur efficacité énergétique tout au long du cycle de vie du bâtiment (Tableau 7.8).

Tableau 7.8 Résultat des simulations du cas d'étude avec les cas optimaux des stratégies passive du climat de Ghardaïa avec les différents RCP.

Source : (Auteur, 2023)

	Économies d'énergie (%/an)	ERC; LCC (\$)	Consommation d'énergie (kWh/an)	Consommation d'énergie (kWh/m ² /an)	Réduction de CO ₂ e (%/an)
Cas d'étude	0%	207424.1	243131.8	286.0	0%
Stratégies passives	39%	148696.7	147649.2	173.7	0%
RCP 2.6 en 2050	37%	150551.3	153425.6	180.5	45%
RCP 2.6 en 2100	36%	151395.5	155579.7	183.0	42%
RCP 4.5 en 2050	34%	156246.5	160989.8	189.4	42%
RCP 4.5 en 2100	27%	169447.5	178492.0	210.0	42%
RCP 8.5 en 2050	28%	166518.5	174046.1	204.8	41%
RCP 8.5 en 2100	25%	172207.5	182956.5	215.2	41%

4. Intégration des stratégies actives avec différents RCP

Les tableaux ci-dessous illustrent les divers résultats issus des simulations impliquant l'optimisation des stratégies actives dans différents scénarios RCP, climats et périodes temporelles.

4.1. Cas du climat de Constantine

Pour le climat de Constantine, il est à noter que les différents résultats se rapprochent et oscillent autour de 47%, à l'exception du RCP 4.5 en 2100 où l'écart est de 10% par rapport aux autres scénarios. L'application des stratégies actives dans ce climat permet ainsi de réduire la consommation énergétique du bâtiment du cas d'étude par deux, se situant entre, 2105 kWh/m²/an et environ 100 kWh/m²/an. En ce qui concerne l'ERC, le LCC et la réduction des émissions de CO₂, les résultats se ressemblent, à l'exception du RCP 8.5 en 2100 qui demeure positif, mais avec une différence d'environ 25000\$ par rapport aux autres cas, entraînant une économie réduite de 12 à 13% (Tableau 7.9).

Tableau 7.9 Résultat des simulations du cas d'étude avec les cas optimaux des stratégies active du climat de Constantine avec les différents RCP.

Source : (Auteur, 2023)

	Économies d'énergie (%/an)	ERC; LCC (\$)	Consommation d'énergie (kWh/an)	Consommation d'énergie (kWh/m ² /an)	Réduction de CO ₂ e (%/an)
Cas d'étude	0%	137037.5	174553.1	205.4	0%
Stratégies actives	47%	104898.8	93217.1	109.7	55.7%
RCP 2.6 en 2050	47%	102881.7	92660.3	109.0	53.4%
RCP 2.6 en 2100	46%	103498.4	94251.7	110.9	53.0%
RCP 4.5 en 2050	48%	103143.7	90878.4	106.9	53.3%
RCP 4.5 en 2100	56%	113474.9	76890.1	90.5	54.2%
RCP 8.5 en 2050	49%	106467.5	89802.8	105.7	52.5%
RCP 8.5 en 2100	47%	128375.7	93337.3	109.8	40.5%

4.2. Cas du climat d'Alger

Pour le climat d'Alger, les résultats se ressemblent également pour la plupart des scénarios RCP, à l'exception du cas du RCP 8.5 en 2100 où une baisse est également observée, bien que moins significative que pour le climat de Constantine, avec une réduction de 3 % de l'économie. En ce qui concerne l'ERC et le LCC, on remarque une fluctuation des résultats qui augmentent au fil des années, atteignant leur point culminant avec le RCP 8.5 en 2100. En revanche, pour la réduction des émissions de CO₂e, une tendance inverse est constatée, le cas le plus favorable étant le RCP 8.5 en 2100, qui atteint une réduction allant jusqu'à 64% (Tableau 7.10).

Tableau 7.10 Résultat des simulations du cas d'étude avec les cas optimaux des stratégies active du climat d'Alger avec les différents RCP.

Source : (Auteur, 2023)

	Économies d'énergie (%/an)	ERC; LCC (\$)	Consommation d'énergie (kWh/an)	Consommation d'énergie (t)	Réduction de CO2e (%/an)
Cas d'étude	0%	120920.2	135788.6	159.8	0%
Stratégies actives	52%	91848.5	65618.6	77.2	59%
RCP 2.6 en 2050	40%	120284.6	80931.6	95.2	60%
RCP 2.6 en 2100	41%	118666.1	80322.0	94.5	60%
RCP 4.5 en 2050	41%	119549.6	79882.4	94.0	60%
RCP 4.5 en 2100	42%	126540.8	78232.4	92.0	62%
RCP 8.5 en 2050	41%	121633.4	79791.5	93.9	61%
RCP 8.5 en 2100	38%	139975.3	83920.9	98.7	64%

4.3. Cas du climat de Ghardaïa

Pour le climat de Ghardaïa, les résultats suivent des tendances similaires à celles des autres climats, avec une réduction plus marquée de la consommation énergétique en tête, suivi d'une diminution conduisant à une différence maximale de 5% entre les différents scénarios. En ce qui concerne l'ERC et le LCC, les données indiquent une augmentation allant jusqu'à 51034 \$ dans le cas le plus défavorable, mais cette augmentation reste inférieure à celle du cas d'étude initial. Pour la réduction des émissions de CO2e, les résultats reflètent la même tendance que pour le climat d'Alger, avec une diminution croissante atteignant jusqu'à 70% pour le RCP 8.5 en 2100. En conclusion, l'analyse des résultats met en évidence que les stratégies actives permettent une réduction de la consommation énergétique, de l'ERC et du LCC, ainsi que des émissions de CO2e, pouvant atteindre jusqu'à 50% dans la plupart des cas. Ceci est observé dans divers climats et avec différents scénarios RCP, démontrant ainsi leur polyvalence et leur pertinence pour la conception de bâtiments net zéro énergie (Tableau 7.11).

Tableau 7.11 Résultat des simulations du cas d'étude avec les cas optimaux des stratégies active du climat de Ghardaïa avec les différents RCP.

Source : (Auteur, 2023)

Point	Économies d'énergie (%/an)	ERC; LCC (\$)	Consommation d'énergie (kWh/an)	Consommation d'énergie (kWh/m ² /an)	Réduction de CO2e (%/an)
Cas d'étude	0%	207424.1	243131.8	286.0	0%
Stratégies actives	59%	112676.0	99034.6	116.5	54%
RCP 2.6 en 2050	60%	140314.6	98436.7	115.8	65%
RCP 2.6 en 2100	59%	139429.0	100743.2	118.5	65%
RCP 4.5 en 2050	58%	143336.7	101959.4	120.0	66%
RCP 4.5 en 2100	56%	152521.2	107064.7	126.0	67%
RCP 8.5 en 2050	56%	151924.8	106422.9	125.2	66%
RCP 8.5 en 2100	55%	163710.9	108681.1	127.9	70%

5. Intégration des Énergies Renouvelables avec différents RCP

L'utilisation des énergies renouvelables lors de la conception de bâtiments à haute efficacité énergétique est devenue une pratique courante. Cependant, il est important de noter que l'adoption de telles technologies nécessite des études de conception approfondies afin d'identifier les éléments les plus optimaux pour parvenir à une conception aboutissant à une consommation net zéro énergie. Les tableaux suivants présentent les résultats des simulations du scénario optimal en comparaison avec le cas d'étude initial, ainsi qu'avec plusieurs autres simulations englobant divers scénarios RCP. Ces simulations permettent de non seulement anticiper l'évolution de notre cas dans le futur, mais aussi de prendre en compte différents climats étudiés. Le scénario le plus optimal a permis de réduire la consommation énergétique de 20%, 44% et 26% respectivement pour les climats de Constantine, Alger et Ghardaïa, par rapport au cas d'étude initial. La puissance utilisée pour chaque cas est celle qui servira par la suite à atteindre le concept de bâtiment à consommation net zéro.

5.1. Cas du climat de Constantine

Pour le climat de Constantine, il est à noter que la réduction de la consommation énergétique est presque uniforme, à l'exception du scénario RCP 8.5 en 2100, qui accumulera une perte de 8% par rapport au cas d'étude initial, entraînant ainsi une baisse totale de 28% en raison de la hausse de la consommation énergétique dans ce cas. On observe également une augmentation des valeurs de l'ERC et du LCC pour les différents scénarios par rapport au cas d'étude initial, atteignant jusqu'à 63971 \$ pour le scénario le plus défavorable. En ce qui concerne la réduction des émissions de CO2e, on note une diminution des niveaux de

réduction, débutant à 32% pour le scénario le plus favorable et atteignant jusqu'à 129% pour le scénario le plus défavorable (Tableau 7.12).

Tableau 7.12 Résultat des simulations du cas d'étude avec les cas optimaux des stratégies EnR (Solaire) du climat de Constantine avec les différents RCP.

Source : (Auteur, 2023)

	Économies d'énergie (%/an)	ERC; LCC (\$)	Consommation d'énergie (kWh/an)	Consommation d'énergie (kWh/m ² /an)	Réduction de CO ₂ e (%/an)
Cas d'étude	0%	137037.5	174553.1	205.4	0%
EnR Solaire	20%	142218.2	139531.1	164.2	32%
RCP 2.6 en 2050	20%	146075.9	139197.0	163.8	30%
RCP 2.6 en 2100	19%	147449.7	141576.8	166.6	30%
RCP 4.5 en 2050	19%	148989.0	140630.2	165.4	29%
RCP 4.5 en 2100	15%	162183.6	149114.6	175.4	26%
RCP 8.5 en 2050	18%	154099.6	143613.6	169.0	28%
RCP 8.5 en 2100	-8%	201008.8	188154.6	221.4	19%

5.2. Cas du climat d'Alger

Pour le climat d'Alger, une notable diminution de la réduction de la consommation énergétique est à noter, équivalant à près de 44% par rapport au cas d'étude initial. Ensuite, il y a une décroissance de cette réduction, atteignant le quart pour le RCP 8.5 en 2050, et enfin, un déficit de -14% pour le RCP 8.5 en 2100. En ce qui concerne l'ERC et le LCC, on constate que le premier cas est le seul à afficher une réduction d'ERC et LCC, tandis que tous les autres cas engendrent des pertes, atteignant jusqu'à 72000 \$ pour le scénario le plus défavorable. Quant à la réduction des émissions de CO₂e, tous les cas présentent une réduction positive, atteignant 61% pour le cas le plus favorable et 30% pour le cas le plus défavorable (Tableau 7.13).

Tableau 7.13 Résultat des simulations du cas d'étude avec les cas optimaux des stratégies EnR du climat d'Alger avec les différents RCP.

Source : (Auteur, 2023)

	Économies d'énergie (%/an)	ERC; LCC (\$)	Consommation d'énergie (kWh/an)	Consommation d'énergie (kWh/m ² /an)	Réduction de CO ₂ e (%/an)
Cas d'étude	0%	120920.2	135788.6	159.8	0%
EnR Solaire	44%	118886.1	75879.0	89.3	61%
RCP 2.6 en 2050	15%	154040.6	116026.8	136.5	42%
RCP 2.6 en 2100	16%	152202.9	114280.1	134.4	42%
RCP 4.5 en 2050	15%	153552.0	115631.2	136.0	41%
RCP 4.5 en 2100	9%	166771.0	123532.4	145.3	37%
RCP 8.5 en 2050	11%	159113.3	120496.2	141.8	39%
RCP 8.5 en 2100	-14%	192897.5	154817.7	182.1	30%

5.3. Cas du climat de Ghardaïa

Pour le cas de Ghardaïa, tous les scénarios présentent une réduction de la consommation, allant de 9% pour le cas le plus défavorable à 26% pour le cas le plus favorable, équivalant à près de 73 kWh/m²/an. Contrairement aux autres climats, Ghardaïa présente quatre cas où l'ERC et le LCC affichent une réduction positive, à savoir les cas d'énergies renouvelables simples et les scénarios RCP 2.6 en 2050 et 2100. Pour le RCP 4.5 en 2100, on remarque également une stabilité des réductions des émissions de CO₂e, variant de 30% à 24% par rapport au cas d'étude initial (Tableau 7.14). En conclusion, l'analyse des résultats démontre l'efficacité de l'utilisation des panneaux solaires photovoltaïques comme source d'énergie renouvelable pour atteindre la net zéro énergie dans les bâtiments. Non seulement les panneaux photovoltaïques ont fait leurs preuves en tant qu'éléments énergétiquement efficaces et fiables, mais ils ont également démontré leur capacité à réduire les émissions de CO₂e à travers les différents climats étudiés ainsi que les divers scénarios RCP utilisés. Il est important de noter que les variations des réductions de consommation énergétique dans les différents scénarios RCP sont dues à l'augmentation de la consommation énergétique dans le bâtiment avec les différents scénarios RCP utilisés.

Tableau 7.14 Résultat des simulations du cas d'étude avec les cas optimaux des stratégies EnR du climat de Ghardaïa avec les différents RCP.

Source : (Auteur, 2023)

	Économies d'énergie (%/an)	ERC; LCC (\$)	Consommation d'énergie (kWh/an)	Consommation d'énergie (kWh/m ² /an)	Réduction de CO ₂ e (%/an)
Cas d'étude	0%	207424.1	243131.8	286.0	0%
EnR Solaire	26%	203974.9	180792.6	212.7	30%
RCP 2.6 en 2050	26%	203974.9	180792.6	212.7	30%
RCP 2.6 en 2100	22%	205384.2	188834.5	222.2	28%
RCP 4.5 en 2050	19%	213697.7	197653.0	232.5	26%
RCP 4.5 en 2100	22%	205384.2	188834.5	222.2	28%
RCP 8.5 en 2050	10%	229649.1	217872.0	256.3	24%
RCP 8.5 en 2100	9%	232195.1	221672.1	260.8	24%

6. Simulation du bâtiment a net zéro énergie

La transition vers une approche de bâtiments net zéro énergie représente un changement de paradigme significatif dans le secteur de la construction et de la conception. Cette transition offre une voie pour non seulement réduire la consommation énergétique, mais aussi l'ERC et le LCC et les émissions de gaz à effet de serre. Dans notre analyse, nous avons

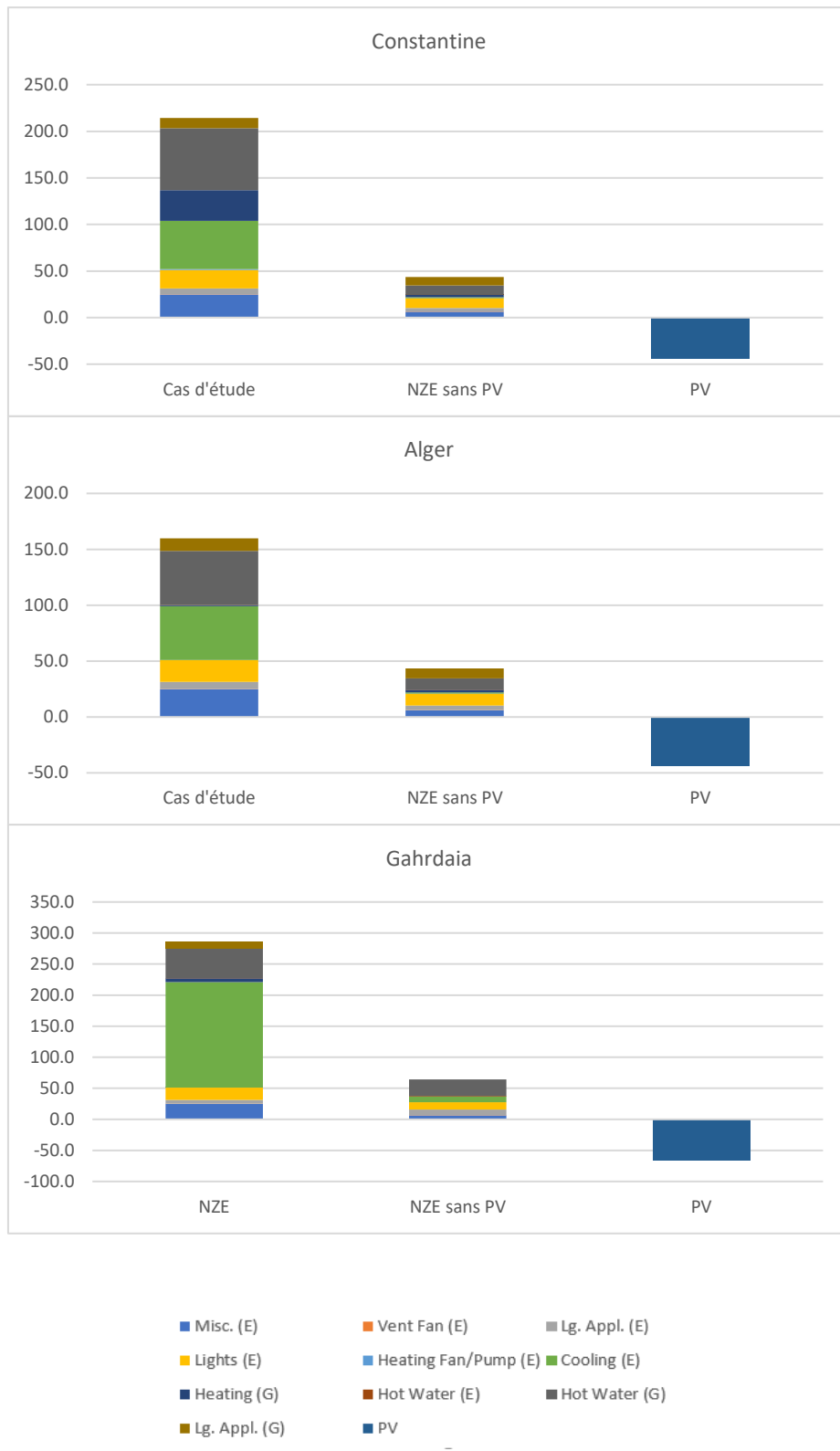


Figure 7.5 Consommation des bâtiments cas d'étude et leurs transformations vers la NZE

Source : (Auteur, 2023)

examiné les résultats des simulations du cas d'étude initial, ainsi que les résultats des différentes stratégies mises en œuvre pour atteindre la net zero énergie.

Dans les trois cas étudiés, nous avons réussi à atteindre la neutralité énergétique en combinant différentes stratégies passives, actives et énergies renouvelables (Figure 7.5).

Dans le climat de Constantine, avec une consommation initiale de 205,4 kWh/m²/an, nous avons réalisé une réduction de 82,8%, soit un total de 170 kWh/m²/an, en utilisant diverses stratégies passives et actives. En utilisant des panneaux solaires, nous avons atteint une réduction supplémentaire de 17,6%, soit 36,2 kWh/m²/an, pour atteindre un total de 100,4%, équivalent à -0,1 kWh/m²/an. Nous avons également réduit les émissions de CO₂e de 111,4%, soit une réduction totale de 84,3 CO₂e/m²/an.

Pour le climat d'Alger, partant d'une consommation initiale de 159,8 kWh/m²/an, nous avons également réussi à atteindre la neutralité énergétique avec une réduction totale de 100,7%, équivalant à -1,1 kWh/m²/an. Cela a été obtenu grâce à une réduction de 73,2% grâce aux stratégies passives et actives, soit 116,9 kWh/m²/an, et le reste avec les énergies renouvelables, soit 27,5%, équivalent à 44 kWh/m²/an. Nous avons également réussi à réduire les émissions de CO₂e de 126,5%.

Pour le climat de Ghardaïa, avec une consommation initiale de 286,0 kWh/m²/an, nous avons atteint une réduction de la consommation énergétique de 100,4%, soit -0,5 kWh/m²/an au total. Cela a été réalisé avec 77,1% grâce aux stratégies passives et actives, et 23,3% grâce aux stratégies d'énergies renouvelables. De plus, nous avons réussi à réduire les émissions de gaz à effet de serre de 107,6%.

Tableau 7.15 Résultats du cas d'exemple de Constantine en étape par étape

Source : (Auteur, 2023)

	Consommation énergétique (kWh/m ² /an)		Diminution de GES (CO ₂ e/m ² /an)	
	Diminution par stratégie	Diminution totale	Diminution par stratégie	Diminution totale
Bâtiment de référence	0.0	205.4	0.0	75.7
Stratégies passives				
Orientation	-7.3	198.1	-3.9	71.8
Effet inter-batiments	0.7	198.8	-2.5	69.3
Valeur-u mur	-11.0	187.8	-0.7	68.6
Valeur-u dalle	-11.0	176.7	-1.5	67.1
Taux de fenestration	-14.0	162.7	-6.5	60.6
Type de fenêtre	-6.0	156.7	-3.5	57.1
Auvent	-1.3	155.5	-1.0	56.1
Étanchéité à l'air	-7.1	148.4	1.6	57.7
Naturel ventilation	-17.5	130.8	-10.7	47.0
	-74.5	36.3%	-28.7	37.9%
Stratégies actives				

CHAPITRE - VI - LE BATIMENT A NET ZERO ÉNERGIE FACE AUX SCENARIOS RCP : UN
CHEMIN VERS UNE ARCHITECTURE DURABLE ET RESILIENTE

Climatiseur de pièce	-6.1	124.7	-3.6	43.4
Chaudière et distribution	-4.4	120.3	-0.9	42.5
Chauffe-eau	-48.2	72.1	-9.2	33.3
Éclairage	-8.2	63.9	-5.1	28.2
Électroménager	-13.1	50.7	-1.4	26.8
Charge et taux d'utilisation	-15.4	35.3	-10.1	16.7
	-95.5	46.5%	-30.3	40.0%
Stratégies EnR (Solaire)				
Panneau solaire	-36.2	-0.9	-25.3	-8.6
	-36.2	17.6%	-25.3	33.4%
Total	-206.2	100.4%	-84.3	111.4%

En termes de présentation, il est également crucial d'évaluer à chaque phase quel est son impact global. C'est pourquoi nous avons tenté de fournir la quantité de diminution de la consommation énergétique et des émissions de gaz à effet de serre (GES), mais cette fois-ci après avoir identifié les stratégies optimales. Cette approche nous permet d'observer la quantité d'énergie et de GES réduite à chaque stade de l'implémentation de nouvelles stratégies, mettant en évidence leur impact réel sur le bâtiment (Tableau 7.15).

Cette étude inclut également divers scénarios RCP, ce qui nous permet de saisir le potentiel de l'impact de la transition vers la consommation nette d'énergie sur le bâtiment dans le futur. En scrutant les données présentées dans les tableaux, notre objectif est de mettre en avant les diverses implications de l'adoption de la consommation nette d'énergie dans les bâtiments. Ceci nous permet de mieux appréhender l'étendue de son impact sur la consommation énergétique, les coûts et la réduction des émissions de CO₂e. Cette approche permet d'explorer les différents défis et opportunités associés à l'utilisation des diverses stratégies inhérentes à ce concept.

6.1. Cas du climat de Constantine

Pour le climat de Constantine, les résultats démontrent la faisabilité d'atteindre le niveau de consommation net zéro énergie dans tous les scénarios RCP étudiés, à l'exception du cas du RCP 8.5 en 2100. Une diminution totale de 205.4 kWh/m²/an a été réalisée en réduisant également l'ERC et le LCC de 47364 \$. Ce cas est le plus favorable parmi les trois climats étudiés. Le scénario le plus prometteur est celui du RCP 2.6 en 2050, qui permet d'atteindre une diminution de consommation énergétique de 100.6%. Une réduction significative des émissions de CO₂e est également observée, avec une baisse de 103.2% pour le cas le plus

défavorable du RCP 8.5 en 2100, et une baisse de 111.5% avec le RCP 2.6 en 2050 (Tableau 7.16).

Tableau 7.16 Résultat des simulations du cas d'étude avec les cas optimaux de la net zéro énergie du climat de Constantine avec les différents RCP.

Source : (Auteur, 2023)

	Économies d'énergie (%/an)	ERC; LCC (\$)	Consommation d'énergie (kWh/an)	Consommation d'énergie (kWh/m ² /an)	Réduction de CO ₂ e (%/an)
Cas d'étude	0%	137037.5	174553.1	205.4	0%
Net Zéro Énergie	100.1%	89673.4	-126.0	-0.1	111.4%
RCP 2.6 en 2050	100.6%	88207.6	-1096.1	-1.3	111.5%
RCP 2.6 en 2100	100.3%	88748.8	-536.3	-0.6	111.2%
RCP 4.5 en 2050	100.4%	88947.2	-621.3	-0.7	110.7%
RCP 4.5 en 2100	100.3%	91237.2	-586.1	-0.7	110.0%
RCP 8.5 en 2050	100.1%	90677.1	-257.9	-0.3	110.1%
RCP 8.5 en 2100	96.7%	100331.7	5773.5	6.8	103.2%

6.2. Cas du climat d'Alger

Pour le climat d'Alger, on remarque qu'il est possible d'atteindre la net zéro énergie avec une économie de 100.7% sur la consommation énergétique. Cela permet de réduire la consommation du cas d'étude initial de 159.8 kWh/m²/an à une valeur négative de -1.1 kWh/m²/an. Cependant, il est important de noter que cette réalisation n'est possible que pour le cas actuel. Pour tous les autres scénarios RCP, le seuil de consommation net d'énergie égale à zéro n'est pas atteint, bien que ces scénarios se rapprochent de cet objectif. Cette tendance est également observée pour l'ERC et le LCC, où une économie positive n'est réalisée que pour le cas actuel, dépassant le cas d'étude initial de 7252 \$. En revanche, les émissions de CO₂e peuvent être réduites dans les différents scénarios étudiés (Tableau 7.17).

Tableau 7.17 Résultat des simulations du cas d'étude avec les cas optimaux de la net zéro énergie du climat d'Alger avec les différents RCP.

Source : (Auteur, 2023)

	Économies d'énergie (%/an)	ERC; LCC (\$)	Consommation d'énergie (kWh/an)	Consommation d'énergie (kWh/m ² /an)	Réduction de CO ₂ e (%/an)
Cas d'étude	0%	120920.2	135788.6	159.8	0%
Net Zéro Énergie	100.7%	100439.3	-937.8	-1.1	126.5%
RCP 2.6 en 2050	83.8%	128172.9	21983.3	25.9	110.0%
RCP 2.6 en 2100	84.0%	127527.0	21737.1	25.6	110.2%
RCP 4.5 en 2050	83.7%	128591.5	22121.0	26.0	109.1%
RCP 4.5 en 2100	87.8%	132044.9	16499.9	19.4	109.6%
RCP 8.5 en 2050	85.2%	131051.2	20075.4	23.6	109.0%

RCP 8.5 en 2100	87.3%	144940.4	17300.0	20.4	103.8%
------------------------	-------	----------	---------	------	--------

6.3. Cas du climat de Ghardaïa

Comme pour le climat d'Alger, il est notable que le climat de Ghardaïa ne peut pas atteindre le seuil de net zéro énergie, sauf dans le cas actuel. Cependant, il affiche une amélioration par rapport au climat précédent, atteignant une moyenne de 91% pour les différents scénarios. De plus, il est en mesure de réaliser des économies au niveau de l'ERC et le LCC dans les divers scénarios. En outre, il peut parvenir à une réduction de 100% des émissions de CO₂e dans toutes les situations (Tableau 7.18).

Tableau 7.18 Résultat des simulations du cas d'étude avec les cas optimaux de la net zéro énergie du climat de Ghardaïa avec les différents RCP.

Source : (Auteur, 2023)

	Économies d'énergie (%/an)	ERC; LCC (\$)	Consommation d'énergie (kWh/an)	Consommation d'énergie (kWh/m ² /an)	Réduction de CO ₂ e (%/an)
Cas d'étude	0%	207424.1	243131.8	286.0	0%
Net Zéro Énergie	100.4%	111841.0	-451.3	-0.5	107.6%
RCP 2.6 en 2050	91.0%	113169.3	2904.3	3.4	105.7%
RCP 2.6 en 2100	91.1%	113420.6	3009.8	3.5	105.6%
RCP 4.5 en 2050	90.9%	114086.4	3678.0	4.3	105.0%
RCP 4.5 en 2100	93.2%	116585.1	5199.1	6.1	103.6%
RCP 8.5 en 2050	91.7%	116058.6	5120.0	6.0	104.0%
RCP 8.5 en 2100	92.9%	144940.4	17300.0	20.4	100.9%

Conclusion

Une compréhension approfondie des implications du changement climatique est un élément essentiel pour la conception de bâtiments durables et écoénergétiques, en vue d'un avenir plus respectueux de l'environnement. La pertinence fondamentale de ce chapitre réside dans sa contribution substantielle à une analyse approfondie de l'interaction complexe entre l'environnement bâti et le climat. La compréhension et l'évaluation approfondies des concepts climatiques fondamentaux soulignent leur importance cruciale dans la conception moderne et durable des bâtiments. De plus, il convient de souligner l'impact significatif du changement climatique sur l'environnement construit. L'utilisation d'outils de calcul climatique devient indispensable pour évaluer les répercussions étendues de ce phénomène sur les performances des bâtiments. L'une des méthodes notables dans ce contexte est l'application des scénarios de concentration représentatifs (RCP), offrant une approche normalisée pour modéliser les projections climatiques futures.

Au sein de ce chapitre, une analyse méticuleuse a été entreprise au moyen de simulations énergétique de bâtiments, confrontant différentes études de cas avec leurs stratégies distinctes, ainsi que des scénarios de bâtiments net zéro énergie (NZE) et des variations avec différents RCP 2.6, 4.5 et 8.5 dans notre cas. Les tableaux suivants synthétisent les résultats accumulés tout au long de ce chapitre (Tableau 7.19, Tableau 7.20, Tableau 7.21, Tableau 7.22, Tableau 7.23) :

Tableau 7.19 Résumé des résultats des simulations du cas d'étude avec les différents RCP de chaque climat.

Source : (Auteur, 2023)

Cas d'étude			
	Économies d'énergie (%/an)	LCC ; ERC (%)	Réduction de CO2e (%/an)
Constantine			
Cas d'étude	0.0%	0.0%	0%
RCP 2.6 en 2050	-0.3%	-3.2%	-10%
RCP 2.6 en 2100	-9.5%	-4.1%	-10%
RCP 4.5 en 2050	-11.5%	-5.1%	-12%
RCP 4.5 en 2100	-24.2%	-14.9%	-26%
RCP 8.5 en 2050	-15.8%	-8.7%	-17%
RCP 8.5 en 2100	-27.6%	-42.9%	-26%
Alger			
Cas d'étude	0%	0.0%	0%
RCP 2.6 en 2050	-23%	-25.0%	-30%
RCP 2.6 en 2100	-22%	-23.4%	-20%
RCP 4.5 en 2050	-22%	-24.0%	-30%
RCP 4.5 en 2100	-28%	-35.0%	-40%
RCP 8.5 en 2050	-26%	-28.8%	-30%
RCP 8.5 en 2100	-51%	-56.8%	-80%
Ghardaïa			
Cas d'étude	0%	0.0%	0%
RCP 2.6 en 2050	6%	5.8%	6%
RCP 2.6 en 2100	-2%	0.5%	-2%
RCP 4.5 en 2050	-2%	-3.4%	-6%
RCP 4.5 en 2100	-17%	-13.6%	-22%
RCP 8.5 en 2050	-13%	-11.0%	-17%
RCP 8.5 en 2100	-43%	-37.7%	-56%

Tableau 7.20 Résumé des résultats de simulation du cas d'étude avec les cas optimaux des stratégies passives de chaque climat avec les différents RCP.

Source : (Auteur, 2023)

Bâtiment Passive			
	Économies d'énergie (%/an)	LCC ; ERC (%)	Réduction de CO2e (%/an)
Constantine			
Cas d'étude	0%	0.0%	0%
Stratégies passives	15%	11.5%	20.60%
RCP 2.6 en 2050	16%	9.6%	23.30%
RCP 2.6 en 2100	16%	8.7%	23.30%
RCP 4.5 en 2050	15%	7.6%	22.60%
RCP 4.5 en 2100	13%	0.0%	23.10%
RCP 8.5 en 2050	15%	5.0%	22.60%
RCP 8.5 en 2100	-8%	-27.3%	18.30%
Alger			
Cas d'étude	0%	0.0%	0%
Stratégies passives	22%	17.7%	32%
RCP 2.6 en 2050	23%	-3.8%	29%
RCP 2.6 en 2100	25%	-2.0%	29%
RCP 4.5 en 2050	24%	-2.4%	29%
RCP 4.5 en 2100	22%	-11.1%	30%
RCP 8.5 en 2050	22%	-6.7%	29%
RCP 8.5 en 2100	5%	-29.2%	28%
Ghardaïa			
Cas d'étude	0%	0.0%	0%
Stratégies passives	39%	28.3%	45%
RCP 2.6 en 2050	37%	27.4%	42%
RCP 2.6 en 2100	36%	27.0%	42%
RCP 4.5 en 2050	34%	24.7%	42%
RCP 4.5 en 2100	27%	18.3%	41%
RCP 8.5 en 2050	28%	19.7%	41%
RCP 8.5 en 2100	25%	17.0%	40%

Tableau 7.21 Résumé des résultats de simulation du cas d'étude avec les cas optimaux des stratégies actives de chaque climat avec les différents RCP.

Source : (Auteur, 2023)

Bâtiment Active			
	Économies d'énergie (%/an)	LCC ; ERC (%)	Réduction de CO2e (%/an)
Constantine			
Cas d'étude	0%	0.0%	0%
Stratégies actives	47%	23.5%	55.7%
RCP 2.6 en 2050	47%	24.9%	53.4%
RCP 2.6 en 2100	46%	24.5%	53.0%
RCP 4.5 en 2050	48%	24.7%	53.3%
RCP 4.5 en 2100	56%	17.2%	54.2%
RCP 8.5 en 2050	49%	22.3%	52.5%
RCP 8.5 en 2100	47%	6.3%	40.5%
Alger			
Cas d'étude	0%	0.0%	0%
Stratégies actives	52%	24.0%	59%
RCP 2.6 en 2050	40%	0.5%	60%
RCP 2.6 en 2100	41%	1.9%	60%
RCP 4.5 en 2050	41%	1.1%	60%
RCP 4.5 en 2100	42%	-4.6%	62%
RCP 8.5 en 2050	41%	-0.6%	61%
RCP 8.5 en 2100	38%	-15.8%	64%
Ghardaïa			
Cas d'étude	0%	0.0%	0%
Stratégies actives	59%	45.7%	54%
RCP 2.6 en 2050	60%	32.4%	65%
RCP 2.6 en 2100	59%	32.8%	65%
RCP 4.5 en 2050	58%	30.9%	66%
RCP 4.5 en 2100	56%	26.5%	67%
RCP 8.5 en 2050	56%	26.8%	66%
RCP 8.5 en 2100	55%	21.1%	70%

Tableau 7.22 Résumé des résultats de simulation du cas d'étude avec les cas optimaux des stratégies EnR de chaque climat avec les différents RCP.

Source : (Auteur, 2023)

Energie renouvelable			
	Économies d'énergie (%/an)	LCC ; ERC (%)	Réduction de CO2e (%/an)
Constantine			
Cas d'étude	0%	0.0%	0%
EnR Solaire	20%	-3.8%	32%
RCP 2.6 en 2050	20%	-6.6%	30%
RCP 2.6 en 2100	19%	-7.6%	30%
RCP 4.5 en 2050	19%	-8.7%	29%
RCP 4.5 en 2100	15%	-18.3%	26%
RCP 8.5 en 2050	18%	-12.5%	28%
RCP 8.5 en 2100	-8%	-46.7%	19%
Alger			
Cas d'étude	0%	0.0%	0%
EnR Solaire	44%	1.7%	61%
RCP 2.6 en 2050	15%	-27.4%	42%
RCP 2.6 en 2100	16%	-25.9%	42%
RCP 4.5 en 2050	15%	-27.0%	41%
RCP 4.5 en 2100	9%	-37.9%	37%
RCP 8.5 en 2050	11%	-31.6%	39%
RCP 8.5 en 2100	-14%	-59.5%	30%
Ghardaïa			
Cas d'étude	0%	0.0%	0%
EnR Solaire	26%	1.7%	30%
RCP 2.6 en 2050	26%	1.7%	30%
RCP 2.6 en 2100	22%	1.0%	28%
RCP 4.5 en 2050	19%	-3.0%	26%
RCP 4.5 en 2100	22%	1.0%	28%
RCP 8.5 en 2050	10%	-10.7%	24%
RCP 8.5 en 2100	9%	-11.9%	24%

Tableau 7.23 Résumé des résultats de simulation du cas d'étude avec les cas optimaux de la NZE de chaque climat avec les différents RCP.

Source : (Auteur, 2023)

Net Zéro Énergie			
	Économies d'énergie (%/an)	LCC ; ERC (%)	Réduction de CO2e (%/an)
Constantine			
Cas d'étude	0%	0.0%	0%
Net Zéro Énergie	100.1%	34.6%	111.4%
RCP 2.6 en 2050	100.6%	35.6%	111.5%
RCP 2.6 en 2100	100.3%	35.2%	111.2%
RCP 4.5 en 2050	100.4%	35.1%	110.7%
RCP 4.5 en 2100	100.3%	33.4%	110.0%
RCP 8.5 en 2050	100.1%	33.8%	110.1%
RCP 8.5 en 2100	96.7%	26.8%	103.2%
Alger			
Cas d'étude	0%	0.0%	0%
Net Zéro Énergie	100.7%	16.9%	126.5%
RCP 2.6 en 2050	83.8%	-6.0%	110.0%
RCP 2.6 en 2100	84.0%	-5.5%	110.2%
RCP 4.5 en 2050	83.7%	-6.3%	109.1%
RCP 4.5 en 2100	87.8%	-9.2%	109.6%
RCP 8.5 en 2050	85.2%	-8.4%	109.0%
RCP 8.5 en 2100	87.3%	-19.9%	103.8%
Ghardaïa			
Cas d'étude	0%	0.0%	0%
Net Zéro Énergie	100.4%	46.1%	107.6%
RCP 2.6 en 2050	91.0%	45.4%	105.7%
RCP 2.6 en 2100	91.1%	45.3%	105.6%
RCP 4.5 en 2050	90.9%	45.0%	105.0%
RCP 4.5 en 2100	93.2%	43.8%	103.6%
RCP 8.5 en 2050	91.7%	44.0%	104.0%
RCP 8.5 en 2100	92.9%	30.1%	100.9%

Ce chapitre met en évidence que les bâtiments net énergie zéro (NZE) démontrent une efficacité remarquable dans la réduction de la consommation énergétique dans divers contextes climatiques, ainsi que dans leur capacité à atténuer les émissions de carbone. Malgré des coûts initiaux plus élevés, leur viabilité est indéniable, surtout lorsqu'on considère différentes implémentations de RCP. L'impact positif sur la réduction des émissions de CO₂e par l'utilisation de ces bâtiments souligne leur rôle crucial dans l'atténuation de l'impact du secteur du bâtiment sur les transitions et les changements climatiques. En tant que puits de carbone potentiels, ces résultats soulignent l'urgence d'accélérer cette transition.

La réussite de cette transition dépend de la collaboration entre divers intervenants, tels que les décideurs politiques, les concepteurs de bâtiments, les investisseurs et le grand public. Malgré des résultats prometteurs, des défis technologiques et économiques subsistent, nécessitant une recherche continue pour optimiser les performances de la NZE avec des coûts accessibles aux parties prenantes du secteur.

Ainsi, face à l'impératif pressant de lutter contre le changement climatique et de promouvoir un avenir plus durable, la NZE émerge comme une voie pragmatique et viable vers un environnement bâti plus écologique et résilient. En adoptant diverses stratégies, il devient possible de créer un environnement qui réduit non seulement la consommation énergétique mais atténue également les émissions de CO₂e. Ces résultats soulignent l'importance cruciale d'accorder la priorité à la NZE en tant qu'élément clé des efforts de lutte contre le changement climatique.

**CHAPITRE -VII- CONCLUSION
GENERALE**

Conclusion

«L'avenir sera soit vert, soit inexistant »

— *Bob Brown*

Au sein de cette étude, nous nous sommes engagés dans une exploration approfondie de l'application de la méthode "Cost-Optimality" dans la conception d'un bâtiment collectif à net zéro énergie (NZE). Cette démarche a été entreprise en intégrant de manière harmonieuse des stratégies passives et actives, ainsi qu'en recourant à des sources d'énergie renouvelable, tout en faisant usage de matériaux techniques disponibles localement dans les contextes climatiques distincts de Constantine, Alger et Ghardaïa en Algérie. De plus, notre analyse a pris en compte trois scénarios prospectifs de changement climatique (RCP).

Les principaux éléments de chaque chapitre peuvent être résumés comme suit : nous avons amorcé notre exploration en retraçant l'évolution de la notion de NZE, depuis ses débuts modestes dans les maisons solaires jusqu'à son incarnation contemporaine. Au cœur de ce développement, nous avons déployé une analyse approfondie englobant diverses facettes, incluant la catégorisation conceptuelle, la métrique et la hiérarchie conceptuelle. Par la suite, nous nous sommes penchés sur l'examen des diverses stratégies adoptées par les chercheurs pour réaliser la NZE, tandis que nous abordions également les considérations économiques inhérentes à cette approche. Par ailleurs, cette investigation a permis la conceptualisation d'une définition de portée générale, adaptée ensuite au contexte algérien par le biais d'exemples concrets. Dans le deuxième chapitre, notre attention s'est tournée vers la transition énergétique en Algérie. Pour introduire ce volet, nous avons esquissé succinctement les bases de l'énergie, établissant ainsi un fondement essentiel pour la compréhension du chapitre. Cette amorce a été suivie d'une plongée approfondie dans le paysage énergétique algérien, abordant la production énergétique ainsi que les réserves. De surcroît, nous avons analysé le rôle du secteur résidentiel au sein du contexte algérien, étayant cette exploration par des données statistiques pertinentes. Par ailleurs, nous avons formulé les contours des politiques d'efficacité énergétique de l'Algérie, prenant en compte les aspects réglementaires, incitatifs et législatifs. Cette enquête a été complétée par une exploration de la relation intrinsèque entre l'énergie et l'environnement, clôturée par l'étude des résultats d'un questionnaire visant à évaluer la sensibilisation et les connaissances des professionnels à l'égard de la NZE. Notre parcours intellectuel nous a ensuite menés à l'élaboration du cadre méthodologique dans le troisième chapitre. Cette structure a été

conçue pour optimiser les performances des bâtiments NZE, en utilisant la méthodologie du "Coût-Optimal". Cette démarche a permis d'aligner les coûts sur la viabilité inhérente du projet. Les chapitres ultérieurs ont été consacrés à l'examen des résultats des simulations. Nous avons exploré l'impact des stratégies passives et actives, ainsi que l'intégration des énergies renouvelables, mettant en lumière l'importance cruciale de la synergie entre l'architecture et le contexte, tout en exposant les répercussions des avancées technologiques sur l'efficacité énergétique. Enfin, le dernier chapitre a formulé les résultats anticipés de la thèse, en simulant les scénarios NZE pour le bâtiment d'étude, en considérant différentes stratégies actives, passives, et d'énergies renouvelables, tout en prenant en compte les scénarios climatiques RCP.

Cette étude a indubitablement enrichi le discours relatif à la durabilité du bâtiment, tel qu'illustré par la conception de la NZE. Nos apports englobent l'élaboration d'une définition exhaustive de la NZE, l'amélioration de la méthodologie "Optimisation des coûts", ainsi que la démonstration éloquent du potentiel inhérent aux stratégies passives, actives et d'énergies renouvelables pour la réalisation de la NZE dans les divers contextes climatiques de l'Algérie, en considérant également plusieurs scénarios RCP.

Les résultats obtenus révèlent que les premiers bâtiments de l'étude affichaient des consommations énergétiques de 205 kWh/m²/an dans des conditions climatiques semi-arides, 160 kWh/m²/an dans un climat méditerranéen à Alger, et 286 kWh/m²/an dans le climat de Ghardaia. Après l'application de l'optimisation selon la méthodologie de la 'Cost Optimality' et l'intégration de diverses stratégies passives, actives et d'énergie renouvelable, ces consommations ont été significativement réduites. À titre d'exemple, à Constantine, la consommation a été réduite à -0.1 kWh/m²/an, représentant une diminution spectaculaire de -100.1%. À Alger, une réduction similaire a été observée avec une diminution de -1.1 kWh/m²/an, soit -100.7%, tandis qu'à Ghardaia, la consommation a diminué de -0.5 kWh/m²/an, soit -100.4%. Ces résultats démontrent clairement la viabilité du concept de la ent à Net Zéro Énergie en Algérie, mettant en lumière l'efficacité des stratégies mises en œuvre pour atteindre des performances énergétiques nettes nulles malgré les défis climatiques variés du pays.

Nos résultats de recherche ont de manière concluante adressé les interrogations de recherche ainsi que les hypothèses sous-tendant cette étude. Par le biais d'une approche empirique rigoureuse et d'une analyse méticuleuse, nous avons corroboré la viabilité de l'approche NZE au sein de divers contextes climatiques, tout en opérant une réduction

substantielle de la consommation énergétique et des émissions de gaz à effet de serre. Cependant, il est essentiel de noter que notre investigation a révélé qu'outre les stratégies passives qui engendrent des coûts minimaux tout en procurant un rendement financier, plusieurs stratégies actives et l'intégration d'énergies renouvelables peuvent se présenter comme des défis budgétaires pour l'accomplissement de la transition vers le concept de la net zéro énergie. Et que les implications de cette recherche dépassent le cadre académique, avec un impact potentiel sur les professionnels, les décideurs politiques et les chercheurs. En mettant en évidence le potentiel et les avantages de l'adoption de la NZE, notre travail offre un modèle pour des pratiques de construction durables, en adéquation avec les objectifs mondiaux de réduction de la consommation énergétique et des émissions. Notre méthodologie choisie s'est avérée aussi efficace pour obtenir les résultats escomptés. La méthodologie "Cost-optimality", associée à une adaptation à notre contexte et aux multi phasages, a permis d'obtenir des résultats approfondis et de réduire le temps nécessaire de la simulation.

En revenant sur les considérations initiales de notre introduction, un alignement évident émerge entre les hypothèses initiales et les résultats de la recherche. Notre exploration de la NZE dans la conception des bâtiments a ainsi parcouru un cycle complet, soulignant l'importance de notre thème et renforçant son urgence face aux mutations environnementales en cours.

La signifiante de cette recherche réside dans son potentiel à redéfinir la trajectoire du contexte de l'environnement bâti. En abordant le concept de la NZE au sein du secteur du bâtiment, notre travail contribue aux connaissances existantes en présentant un cadre holistique qui met l'accent sur l'interconnexion entre la conception, l'énergie et la résilience climatique. À l'ère des défis écologiques persistants, notre recherche offre des orientations pour les professionnels, les chercheurs et les décideurs politiques en vue de paradigmes architecturaux plus durables.

Il est impératif de reconnaître aussi les limitations inhérentes à notre étude. Bien qu'elle offre une vue d'ensemble complète, cette recherche ne couvre pas de manière exhaustive toutes les variables des stratégies et des contextes. Étant donné que l'étude repose sur des stratégies et des climats spécifiques, il existe un espace considérable pour des recherches futures visant à affiner ces résultats à travers des simulations plus spécifiques, qui intègrent les commodités locales et affinent davantage la méthodologie développée ici. Cette perspective offre une opportunité significative d'amélioration des connaissances dans le domaine, permettant une application plus précise des résultats obtenus.

Par ailleurs, la méthodologie que nous avons adoptée représente l'une des étapes majeures pouvant être intégrée dans une feuille de route. Chacune de ces étapes peut être exploitée comme une piste de recherche future visant à accroître la durabilité des bâtiments. Ces démarches sont regroupées en axes principaux :

- **Conception durable du site** : Implique une sélection réfléchie de l'emplacement et la création d'un plan de masse visant à instaurer un environnement de haute qualité.
- **Conception durable du bâtiment** : Englobe des objectifs spécifiques, l'efficacité énergétique, la qualité intérieure, et la phase finale avec les coûts associés.
- **Production, utilisation et fin de vie** : s'articule autour du cycle de vie essentiel, comprenant l'acquisition, l'opération, la fin de vie, et la durabilité globale. Cette approche intégrée offre une perspective holistique pour orienter les futures recherches vers des solutions durables et innovantes dans le domaine de la construction.

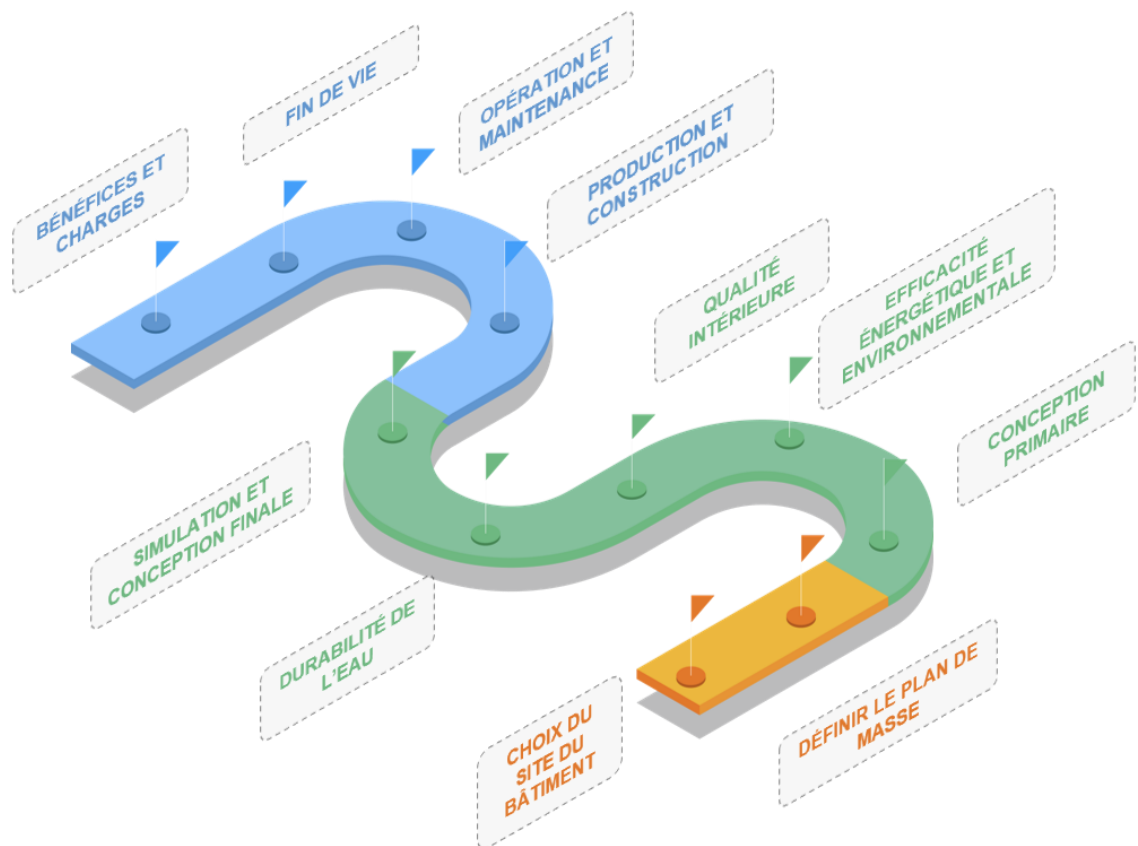


Figure 8.0.1 Feuille de route de la durabilité des bâtiments.
Source : (Auteur, 2023)

En conclusion, il est évident que la conception durable des bâtiments et le concept de la NZE dépassent les spéculations théoriques. Ils représentent des voies tangibles pour améliorer l'environnement construit et harmoniser notre relation

BIBLIOGRAPHIE

- Abanda, F. H., & Byers, L. (2016). An investigation of the impact of building orientation on energy consumption in a domestic building using emerging BIM (Building Information Modelling). *Energy*, *97*, 517–527.
<https://doi.org/10.1016/j.energy.2015.12.135>
- ABDIN, A., EL DEEB, K., & A.M. AL-ABBASI, S. (2018). Effect of Green Roof Design on Energy Saving in Existing Residential Buildings Under Semi-Arid Mediterranean Climate (Amman As a Case Study (. *JES. Journal of Engineering Sciences*, *46*(6), 738–753. <https://doi.org/10.21608/jesaun.2018.115008>
- Aditya, L., Mahlia, T. M. I., Rismanchi, B., Ng, H. M., Hasan, M. H., Metselaar, H. S. C., Muraza, O., & Aditiya, H. B. (2017). A review on insulation materials for energy conservation in buildings. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *73*(August 2015), 1352–1365. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.02.034>
- Aelenei, L., Gonçalves, H., & Rodrigues, C. (2010). *The Road Towards “Zero Energy” in Buildings: Lessons Learned from Solar XXI Building in Portugal*. 1–8.
<https://doi.org/10.18086/eurosun.2010.06.01>
- Afaifia, M., Djar, K. A., Bich-Ngoc, N., & Teller, J. (2021). An energy consumption model for the Algerian residential building’s stock, based on a triangular approach: Geographic Information System (GIS), regression analysis and hierarchical cluster analysis. *Sustainable Cities and Society*, *74*(July).
<https://doi.org/10.1016/j.scs.2021.103191>
- Albadry, S., Tarabieh, K., & Sewilam, H. (2017). Achieving Net Zero-Energy Buildings through Retrofitting Existing Residential Buildings Using PV Panels. *Energy Procedia*, *115*(July), 195–204. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.05.018>
- Albatayneh, A. (2021). Optimisation of building envelope parameters in a semi-arid and warm Mediterranean climate zone. *Energy Reports*, *7*, 2081–2093.
<https://doi.org/10.1016/j.egyr.2021.04.011>
- Alhawari, A., & Mukhopadhyaya, P. (2018). Thermal bridges in building envelopes - An overview of impacts and solutions. *International Review of Applied Sciences and Engineering*, *9*(1), 31–40. <https://doi.org/10.1556/1848.2018.9.1.5>
- Ali-Toudert, F., & Weidhaus, J. (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*, 327–346.
<https://doi.org/10.1016/j.renene.2016.08.043>
- Alsehail, A., & Almhafdy, A. (2020). The Effect of Window-to-Wall Ratio (WWR) and

- Window Orientation (WO) on the Thermal Performance: A preliminary overview. *Environment-Behaviour Proceedings Journal*, 5(15), 165–173.
<https://doi.org/10.21834/ebpj.v5i15.2500>
- Andersen, A., & Velux. (2014). Daylight, Energy and Indoor Climate Basic Book. *VELUX.Com*, 150.
- Ascione, F., Bianco, N., De Stasio, C., Mauro, G. M., & Vanoli, G. P. (2016). Multi-stage and multi-objective optimization for energy retrofitting a developed hospital reference building: A new approach to assess cost-optimality. *Applied Energy*, 174, 37–68.
<https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.04.078>
- ASHRAE. (2014). Measurement of Energy, Demand, and Water Savings. *ASHRAE Guideline 14-2014*, 4, 1–150. www.ashrae.org
- Athienitis, A., & O'Brien, W. (2015). *Modeling, Design, and Optimization of Net-Zero Energy Buildings*.
- Attia, S. (2016). Towards regenerative and positive impact architecture: A comparison of two net zero energy buildings. *Sustainable Cities and Society*, 26, 393–406.
<https://doi.org/10.1016/j.scs.2016.04.017>
- Attia, S., Gratia, E., De Herde, A., & Hensen, J. L. M. (2012). Simulation-based decision support tool for early stages of zero-energy building design. *Energy and Buildings*, 49, 2–15. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2012.01.028>
- Badeche, M., & Bouchahm, Y. (2018). *Energy Demand Reduction Applying Different Window sizes for an office building in semi-arid climate*. 1(1), 1–10.
- Badeche, M., & Bouchahm, Y. (2020). Design optimization criteria for windows providing low energy demand in office buildings in Algeria. *Environmental and Sustainability Indicators*, 6(January), 100024. <https://doi.org/10.1016/j.indic.2020.100024>
- Bahria, S., Amirat, M., Hamidat, A., El Ganaoui, M., & Slimani, M. (2016). Parametric study of solar heating and cooling systems in different climates of Algeria – A comparison between conventional and high-energy-performance buildings. *Energy*, 113, 521–535. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2016.07.022>
- Baird, G., Donn, M. R., & Pool, F. (1985). Hvac Systems' Performance: Commercial Buildings in a Mild Climate. *Batiment International, Building Research & Practice*, 13(3), 170–183. <https://doi.org/10.1080/09613218508551193>
- Beck, H. E., Zimmermann, N. E., McVicar, T. R., Vergopolan, N., Berg, A., & Wood, E. F. (2018). Present and future köppen-geiger climate classification maps at 1-km resolution. *Scientific Data*, 5, 1–12. <https://doi.org/10.1038/sdata.2018.214>

- Benharkat, S. (2021). *Impact of thermal insulation strategies on energy consumption of residential buildings in constantine*. April.
- Benkhaled, E., Mili, M., & Oudina, F. (2022). Illegal Construction Imposed by the Private Lands in Peripheral Urban Areas of M'sila, Algeria. *Engineering, Technology & Applied Science Research*, 12(1), 8188–8192. <https://doi.org/10.48084/etasr.4703>
- Bory, D., Dupont, M., & Rivière, P. (2006). Sizing of Room Air-Conditioners for Minimum Energy Consumption and Peak Power. *Centre Énergétique et Procédés*.
- Boukli Hacene, M. E. A., Laroui, R., Rozale, H., & Chahed, A. (2019). Thermal simulation of the ground source heat pump used for energy needs of a bioclimatic house in Tlemcen City (western ALGERIA). *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization and Environmental Effects*, 00(00), 1–15. <https://doi.org/10.1080/15567036.2019.1671918>
- BP. (2021). Statistical Review of World Energy globally consistent data on world energy markets and authoritative publications in the field of energy. *BP Energy Outlook*, 70, 72.
- BP. (2022). BP Statistical Review of World Energy 2022,(71st edition). *Bp*, 1–60. <https://www.bp.com/content/dam/bp/business-sites/en/global/corporate/pdfs/energy-economics/statistical-review/bp-stats-review-2022-full-report.pdf>
- BPIE. (2010). *Cost optimality discussing methodology and challenges with the recast energy performance of building directive*.
- Bucking, S. (2013). *Pathways to Net-Zero Energy Buildings: An Optimization Methodology* (Issue December).
- Buso, T. (2017). *Nearly Zero Energy multi-functional Buildings - Energy and Economic evaluations*. <https://doi.org/10.6092/polito/porto/2690913>
- Cao, X., Dai, X., & Liu, J. (2016). Building energy-consumption status worldwide and the state-of-the-art technologies for zero-energy buildings during the past decade. *Energy and Buildings*, 128, 198–213. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.06.089>
- Charron, R. (2005). *A Review of Low and Net-Zero Energy Solar Home Initiatives A REVIEW OF LOW AND NET-ZERO ENERGY SOLAR HOME INITIATIVES*.
- Christensen, C., Courtney, A., Horowitz, S., Givler, T., & Barker, G. (2005). Beopt: Software for identifying optimal building designs on the path to zero net energy. *Proceedings of the Solar World Congress 2005: Bringing Water to the World, Including Proceedings of 34th ASES Annual Conference and Proceedings of 30th National Passive Solar Conference*, 1, 55–60.

- Chung, D. (2018). *Real-time measurement of building envelopes to improve U-value characterization*. <https://doi.org/10.17831/REP:ARCC%Y509>
- Climatewatchdata. (2023). *Countries' climate progress*.
<https://www.climatewatchdata.org/>
- COP 3. (1997). Protocole De Kyoto a La Convention-Cadre Des Nations Unies Sur Les Changements Climatiques. *Protocole De Kyoto, 60500*.
- COP26. (2021). COP26 Explained. *UN Climate Change Conference UK 2021*.
<https://ukcop26.org/>
- Denker, Astrid ; El Hassar, S. (2014). *Guide pour une construction Eco-énergétique en Algérie*.
- Derradji, L., Imessad, K., Amara, M., & 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>
- Díaz, J. A., Soutullo, S., Giancola, E., & Ferrer, J. A. (2022). Relationship between construction parameters and thermal loads in a building without internal gains. *Revista Facultad de Ingenieria, 105*, 60–75.
<https://doi.org/10.17533/udea.redin.20210955>
- Dib, D., Abdelhakim, B., Samir, M., Wissem, G., & Youcef, S. (2012). The algerian challenge between the dependence on fossil fuels and its huge potential in renewable energy. *International Journal of Renewable Energy Research, 2*(3), 463–470.
- Doulos, L., Tsangrassoulis, A., & Topalis, F. V. (2014). Multi-criteria decision analysis to select the optimum position and proper field of view of a photosensor. *Energy Conversion and Management, 86*, 1069–1077.
<https://doi.org/10.1016/j.enconman.2014.06.032>
- Dylewski, R. (2019). Optimal thermal insulation thicknesses of external walls based on economic and ecological heating cost. *Energies, 12*(18).
<https://doi.org/10.3390/en12183415>
- EIA. (2016). International energy outlook 2010. In *International Energy Outlook and Projections* (Vol. 1). www.eia.gov/forecasts/ieo%0AThis
- El Sayary, S., & Omar, O. (2021). Designing a BIM energy-consumption template to calculate and achieve a net-zero-energy house. *Solar Energy, 216*(April 2020), 315–320. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2021.01.003>
- Énergie et Mines, M. (2022). *BILAN ÉNERGÉTIQUE NATIONAL 2021*. 1–23.

- EPBD. (2018). *EPBD*.
- Errebai, F. B., Derradji, L., Limam, A., & Amara, M. (2021). Energy efficiency and economic profitability between standard and high energy performance dwellings in a semi-arid climate. *International Journal of Ambient Energy*.
<https://doi.org/10.1080/01430750.2021.1874525>
- Ferrara, M., Monetti, V., & Fabrizio, E. (2018). Cost-optimal analysis for nearly zero energy buildings design and optimization: A critical review. *Energies*, *11*(6).
<https://doi.org/10.3390/en11061478>
- Gaonwe, T. P., Kusakana, K., & Hohne, P. A. (2019). Walk-through Energy Audit and Savings opportunities: Case of Water Heaters at CUT Residential Buildings. *2019 Open Innovations Conference, OI 2019*, 434–439.
<https://doi.org/10.1109/OI.2019.8908172>
- GHEDAMSI, R. (2018). *Développement d'une méthodologie de conception de bâtiments à énergie positive en Algérie*. <http://dspace.univ-ouargla.dz/jspui/handle/123456789/20405>
- Giama, E. (2016). U-Value: A key role parameter for sustainable buildings. *Journal of Sustainable Architecture and Civil Engineering*, *16*(3), 20–31.
<https://doi.org/10.5755/j01.sace.16.3.15442>
- Giunta, C. J. (2019). Watt's in a name? Units of power and energy. *Substantia*, *3*(2), 13–26. <https://doi.org/10.13128/Substantia-403>
- Gouareh, A. (2017). *Maîtrise et optimisation de la gestion énergétique en Algérie Remerciements*. 246. Laboratoire des Matériaux et Systèmes Réactifs
- Hadi Mousavi, M. D. N. (2020). A new decade for social changes. *Technium Social Sciences Journal*, *6*(December), 101–105.
- Hamdy, M., Hasan, A., & Siren, K. (2013). A multi-stage optimization method for cost-optimal and nearly-zero-energy building solutions in line with the EPBD-recast 2010. *Energy and Buildings*, *56*, 189–203. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2012.08.023>
- Harkouss, F. (2018). Conception optimale de bâtiments à énergie nette nulle sous différents climats. In *Revue Teledetection* (Vol. 8, Issue 1).
- Harkouss, F., Fardoun, F., & Biwole, P. H. (2019). Optimal design of renewable energy solution sets for net zero energy buildings. *Energy*, *179*, 1155–1175.
<https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.05.013>
- Hemsath, T. L., & Alagheband Bandhosseini, K. (2015). Sensitivity analysis evaluating basic building geometry's effect on energy use. *Renewable Energy*, *76*, 526–538.

- <https://doi.org/10.1016/j.renene.2014.11.044>
- Hepbasli, A., & Kalinci, Y. (2009). A review of heat pump water heating systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 13(6–7), 1211–1229. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2008.08.002>
- HERSIndex. (2021). *HERS index*. <https://www.hersindex.com/hers-index/what-is-the-hers-index/>
- Hikmat, A., Abu Al-Rub, F. A., Shboul, B., & Moumani, H. Al. (2020). Evaluation of near-net-zero-energy building strategies: A case study on residential buildings in Jordan. *International Journal of Energy Economics and Policy*, 10(6), 325–336. <https://doi.org/10.32479/ijeep.10107>
- Hootman, T. (2013). *NET ZERO ENERGY DESIGN*. Jogn Wiley & Sons Inc.
- Hu, M. (2019). Does zero energy building cost more? – An empirical comparison of the construction costs for zero energy education building in United States. *Sustainable Cities and Society*, 45, 324–334. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2018.11.026>
- IEA. (2008). Energy Efficiency indicators for Public Electricity Production from fossil fuels. *IFAC Proceedings Volumes (IFAC-PapersOnline)*, 35(1), 22. <https://doi.org/10.3182/20020721-6-es-1901.00535>
- IEA. (2021). World Energy Outlook. In *Journal of Helminthology* (Vol. 82, Issue 4). <https://doi.org/10.1017/S0022149X08006196>
- International Energy Agency. (2021). Global Energy Review 2021. In *Global Energy Review 2020*. <https://iea.blob.core.windows.net/assets/d0031107-401d-4a2f-a48b-9eed19457335/GlobalEnergyReview2021.pdf>
- IPCC. (2014). Climate Change 2014 Synthesis Report. In *IPCC* (Vol. 5, Issue 1). [https://doi.org/10.1016/S0022-0248\(00\)00575-3](https://doi.org/10.1016/S0022-0248(00)00575-3)
- IPCC. (2018). Editorial board. *Cambridge University Press*, 16(2), 541–562. [https://doi.org/10.1016/s0959-3780\(06\)00031-8](https://doi.org/10.1016/s0959-3780(06)00031-8)
- Iqbal, M. T. (2004). A feasibility study of a zero energy home in Newfoundland. *Renewable Energy*, 29(2), 277–289. [https://doi.org/10.1016/S0960-1481\(03\)00192-7](https://doi.org/10.1016/S0960-1481(03)00192-7)
- Islam, H., Jollands, M., & Setunge, S. (2015). Life cycle assessment and life cycle cost implication of residential buildings - A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 42, 129–140. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.10.006>
- Janetschek, H., & Iacobuta, G. (2019). *Connections between the Paris Agreement and the 2030 Agenda*. September.
- Jubb, I., Canadell, P., & Dix, M. (2013). *Representative Concentration*

- Pathways. Australian Government, Department of the Environment.* 1–3.
- Kapsalaki, M., Leal, V., & Santamouris, M. (2012). A methodology for economic efficient design of Net Zero Energy Buildings. *Energy and Buildings*, *55*, 765–778.
<https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2012.10.022>
- Kerfah, I. K., El Hassar, S. M. K., Rouleau, J., Gosselin, L., & Larabi, A. (2020). Analysis of strategies to reduce thermal discomfort and natural gas consumption during heating season in Algerian residential dwellings. *International Journal of Sustainable Building Technology and Urban Development*, *11*(1), 45–76.
<https://doi.org/10.22712/susb.20200005>
- Kibert, C. J., & Fard, M. M. (2012). Differentiating among low-energy, low-carbon and net-zero-energy building strategies for policy formulation. *Building Research and Information*, *40*(5), 625–637. <https://doi.org/10.1080/09613218.2012.703489>
- Kilkis, S. (2007). A new metric for net-zero carbon buildings. *Proceedings of the Energy Sustainability Conference 2007, January 2007*, 219–224.
<https://doi.org/10.1115/ES2007-36263>
- Krarti, M., & Ihm, P. (2016). Evaluation of net-zero energy residential buildings in the MENA region. *Sustainable Cities and Society*, *22*, 116–125.
<https://doi.org/10.1016/j.scs.2016.02.007>
- Larousse. (2023). *Encyclopédie et dictionnaires*. Larousse. <https://www.larousse.fr/>
- Laustsen, J. (2008). Energy Efficiency Requirements in Building Codes , Energy Efficiency Policies for New Buildings. *Buildings*, *March*, 1–85.
http://www.iea.org/g8/2008/Building_Codes.pdf
- Leckner, M., & Zmeureanu, R. (2011). Life cycle cost and energy analysis of a Net Zero Energy House with solar combisystem. *Applied Energy*, *88*(1), 232–241.
<https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2010.07.031>
- Li, D. H. W., Lam, T. N. T., & Wong, S. L. (2006). Lighting and energy performance for an office using high frequency dimming controls. *Energy Conversion and Management*, *47*(9–10), 1133–1145. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2005.06.016>
- Li, D. H. W., Yang, L., & Lam, J. C. (2013). Zero energy buildings and sustainable development implications - A review. *Energy*, *54*, 1–10.
<https://doi.org/10.1016/j.energy.2013.01.070>
- Longo, S., Montana, F., & Riva Sanseverino, E. (2019). A review on optimization and cost-optimal methodologies in low-energy buildings design and environmental considerations. *Sustainable Cities and Society*, *45*(November 2018), 87–104.

- <https://doi.org/10.1016/j.scs.2018.11.027>
- Louafi, S., Saliha, A., & Bioclimatique, L. A. (2007). Optimal Orientation for Housing With Low Energy Profil and for Internal Thermal Comfort in Semi Arid. *North, I*(September 2007), 121–125.
- Mahar, W. A., Verbeeck, G., Singh, M. K., & Attia, S. (2019). An investigation of thermal comfort of houses in dry and semi-arid climates of Quetta, Pakistan. *Sustainability (Switzerland)*, *11*(19). <https://doi.org/10.3390/su11195203>
- Makhloufi, A. W., & Louafi, S. (2022). The Impact of Glazing Types and Window-to-Wall Ratios on Energy Consumption in Semi-arid, Mediterranean and Arid Climates. *Prostor*, *2*(64), 140–153. [https://doi.org/doi.org/10.31522/p.30.2\(64\).1](https://doi.org/doi.org/10.31522/p.30.2(64).1)
- Makvandia, G., & Safiuddin, M. (2021). Obstacles to developing net-zero energy (Nze) homes in greater toronto area. *Buildings*, *11*(3), 1–23. <https://doi.org/10.3390/buildings11030095>
- Marino, C., Nucara, A., & Pietrafesa, M. (2017). Does window-to-wall ratio have a significant effect on the energy consumption of buildings? A parametric analysis in Italian climate conditions. *Journal of Building Engineering*, *13*(July), 169–183. <https://doi.org/10.1016/j.job.2017.08.001>
- Marszal, A. J., & Heiselberg, P. (2011). Life cycle cost analysis of a multi-storey residential Net Zero Energy Building in Denmark. *Energy*, *36*(9), 5600–5609. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2011.07.010>
- Marszal, A. J., Heiselberg, P., Bourrelle, J. S., Musall, E., Voss, K., Sartori, I., & Napolitano, A. (2011). Zero Energy Building - A review of definitions and calculation methodologies. *Energy and Buildings*, *43*(4), 971–979. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2010.12.022>
- Mashwani, Z. ur R. (2020). Environment, Climate Change and Biodiversity. In *Environment, Climate, Plant and Vegetation Growth*. https://doi.org/10.1007/978-3-030-49732-3_19
- Mastouri, H., Benhamou, B., Hamdi, H., & Mouyal, E. (2017). Thermal performance assessment of passive techniques integrated into a residential building in semi-arid climate. *Energy and Buildings*, *143*, 1–16. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.03.022>
- Mayer, Z., Hou, Y., Kahn, J., Volk, R., & Schultmann, F. (2021). AI-based thermal bridge detection of building rooftops on district scale using aerial images. *EG-ICE 2021 Workshop on Intelligent Computing in Engineering, Proceedings*, 497–507.

- McNabb, N. (2013). *Strategies to Achieve Net-Zero Energy Homes : A Framework for Future Guidelines Workshop Summary Report* (Issue April).
- Mertz, G. A., Raffio, G. S., & Kissock, K. (2007). Cost optimization of net-zero energy house. *Proceedings of the Energy Sustainability Conference 2007*, 477–488.
<https://doi.org/10.1115/ES2007-36077>
- Mesloub, A., Albaqawy, G. A., & Kandar, M. Z. (2020). The optimum performance of Building Integrated Photovoltaic (BIPV) Windows under a semi-arid climate in Algerian Office Buildings. *Sustainability (Switzerland)*, 12(4).
<https://doi.org/10.3390/su12041654>
- Ministère de l'énergie. (2020). *Bilan Énergétique National 2019*. 44. www.energy.gov.dz
- Ministère de l'énergie et des mines. (2021). *Energies Nouvelles, Renouvelables et Maitrise de l'Énergie*. <https://www.energy.gov.dz/?rubrique=energies-nouvelles-renouvelables-et-maitrise-de-lrenergie>
- Ministère de l'Habitat. (1997). Réglementation thermique des bâtiments d'habitation : règles de calcul des déperditions calorifiques DTR C 3-2. *Document Technique Règlementaire, Ministère de l'habitat, Algérie*, 72.
- Ministère de l'Habitat. (2016). Réglementation thermique des batiments DTR C 3-2. *Document Technique Règlementaire, Ministère de l'habitat, Algérie*, 72.
- Ministère de L'Énergie. (2015). *Commission de régulation de l'électricité et du gaz par décision CREG*.
- Missoum, M., Hamidat, A., Imessad, K., Bensalem, S., & Khoudja, A. (2016a). Impact of a grid-connected PV system application in a bioclimatic house toward the zero energy status in the north of Algeria. *Energy and Buildings*, 128, 370–383.
<https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.07.005>
- Missoum, M., Hamidat, A., Imessad, K., Bensalem, S., & Khoudja, A. (2016b). Impact of a grid-connected PV system application in a bioclimatic house toward the zero energy status in the north of Algeria. *Energy and Buildings*, 128, 370–383.
<https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.07.005>
- Missoum, M., Hamidat, A., Loukarfi, L., & Abdeladim, K. (2014). Impact of rural housing energy performance improvement on the energy balance in the North-West of Algeria. *Energy and Buildings*, 85, 374–388.
<https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2014.09.045>
- Mitchell, J. W., & Braun, J. E. (2012). Principles of Heating, Ventilation, and Air Conditioning in Buildings. In *Jurnal Penelitian Pendidikan Guru Sekolah Dasar*

(Vol. 6, Issue August).

- Morrissey, J., Moore, T., & Horne, R. E. (2011). Affordable passive solar design in a temperate climate: An experiment in residential building orientation. *Renewable Energy*, 36(2), 568–577. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2010.08.013>
- MTEER, ME, & GIZ. (2022). *Développement du cadre réglementaire et incitatif de l'efficacité énergétique en Algérie*.
- Musall, E., Weiss, T., Voss, K., Lenoir, A., Donn, M., Cory, S., & Garde, F. (2016). *Net Zero Energy Solar Buildings: An Overview and Analysis on Worldwide Building Projects*. 1–9. <https://doi.org/10.18086/eurosun.2010.06.16>
- Nait, N., Bourbia, F., & Bouchahm, Y. (2017). Effect of thermal insulation on energy efficiency of the building envelope-semi dry climates. *Advances on Sustainable Cities and Building Development*. <https://www.researchgate.net/publication/322675843>
- National Renewable Energy Laboratory. (2023). *Building Energy Optimization (BEopt)*. <https://www.energy.gov/eere/buildings/building-energy-optimization-beopt-software>
- NBI. (2015). *NBI new building institute, ZEPI*. https://newbuildings.org/code_policy/zepi/
- Nduka, D. O., Ede, A. N., Oyeyemi, K. D., & Olofinnade, O. M. (2019). Awareness, benefits and drawbacks of net zero energy building practices: Construction industry professional's perceptions. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 640(1). <https://doi.org/10.1088/1757-899X/640/1/012026>
- Oh, J., Hong, T., Kim, H., An, J., Jeong, K., & Koo, C. (2017). Advanced strategies for net-zero energy building: Focused on the early phase and usage phase of a building's life cycle. *Sustainability (Switzerland)*, 9(12). <https://doi.org/10.3390/su9122272>
- Østergaard, D. S., Smith, K. M., Tunzi, M., & Svendsen, S. (2022). Low-temperature operation of heating systems to enable 4th generation district heating: A review. *Energy*, 248, 123529. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2022.123529>
- Øvergaard, S. (2008). Definition of primary and secondary energy. *Standard International Energy Classification (SIEC) in the International Recommendation on Energy Statistics (IRES), Energy Statistics*, 1–7.
- Piselli, C., Salvadori, G., Diciotti, L., Fantozzi, F., & Pisello, A. L. (2021). Assessing users' willingness-to-engagement towards Net Zero Energy communities in Italy. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 152, 111627. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111627>
- Pisello, A. L., Taylor, J. E., Xu, X., & Cotana, F. (2012). Inter-building effect: Simulating the impact of a network of buildings on the accuracy of building energy performance

- predictions. *Building and Environment*, 58, 37–45.
<https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2012.06.017>
- Pout, C., & Hitchin, E. R. (2009). Future environmental impacts of room air-conditioners in Europe. *Building Research and Information*, 37(4), 358–368.
<https://doi.org/10.1080/09613210902924898>
- Pullen, S. (2000). Energy assessment of institutional buildings. *Proceedings of the 34th Conference of the Australia and New Zealand Architectural Science Association*, 1–3.
- Riedy, C., Lederwasch, A., & Ison, N. (2011). Defining Zero Emission Buildings. *Review and Recommendations: Final Report*.
- Rodriguez-Ubinas, E., Montero, C., Porteros, M., Vega, S., Navarro, I., Castillo-Cagigal, M., Matallanas, E., & Gutiérrez, A. (2014). Passive design strategies and performance of Net Energy Plus Houses. *Energy and Buildings*, 83, 10–22.
<https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2014.03.074>
- Salom, J., Widén, J., Candanedo, J., Sartori, I., Voss, K., & Marszal, A. (2011). Understanding net zero energy buildings: Evaluation of load matching and grid interaction indicators. *Proceedings of Building Simulation 2011: 12th Conference of International Building Performance Simulation Association*, 6, 2514–2521.
- Santos-Herrero, J. M., Lopez-Guede, J. M., & Flores-Abascal, I. (2021). Modeling, simulation and control tools for nZEB: A state-of-the-art review. In *Renewable and Sustainable Energy Reviews* (Vol. 142, Issue March, p. 110851). Elsevier Ltd.
<https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.110851>
- Sartori, I., Marszal, A. J., & Torcellini, P. (2010). *Aalborg Universitet Criteria for Definition of Net Zero Energy Buildings*.
- Sartori, I., Napolitano, A., & Voss, K. (2012). Net zero energy buildings: A consistent definition framework. *Energy and Buildings*, 48, 220–232.
<https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2012.01.032>
- Song, S. Y., Koo, B. K., & Lee, S. J. (2010). Cost efficiency analysis of design variables for energy-efficient apartment complexes. *Journal of Asian Architecture and Building Engineering*, 9(2), 515–522. <https://doi.org/10.3130/jaabe.9.515>
- Sotehi, O., Chaker, A., & Mahdi, K. (2020). *Study of the Influence of Thermal Insulation on the Energy Consumption of Buildings in Different Climates in Algeria* (pp. 653–659). Springer Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-15-5444-5_82
- Spiridonov, V., & Curic, M. (2020). Fundamentals of meteorology. In *Fundamentals of Meteorology*. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-52655-9>

- Sun, X., Gou, Z., & Lau, S. S. Y. (2018). Cost-effectiveness of active and passive design strategies for existing building retrofits in tropical climate: Case study of a zero energy building. *Journal of Cleaner Production*, 183, 35–45.
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.02.137>
- Szalay, Z., & Zöld, A. (2014). Definition of nearly zero-energy building requirements based on a large building sample. *Energy Policy*, 74(C), 510–521.
<https://doi.org/10.1016/j.enpol.2014.07.001>
- Taherahmadi, J., Noorollahi, Y., & Panahi, M. (2021). Toward comprehensive zero energy building definitions: a literature review and recommendations. *International Journal of Sustainable Energy*, 40(2), 120–148.
<https://doi.org/10.1080/14786451.2020.1796664>
- Tamene, Y., & Serir, L. (2019). Thermal and economic study on building external walls for improving energy efficiency. *International Journal of Heat and Technology*, 37(1), 219–228. <https://doi.org/10.18280/ijht.370127>
- Tarabieh, K., Mashaly, I., & Rashed, Y. (2017). A comparative study for the selection of a curtain wall glazing type suitable in a regional hot arid climate condition. *Proceedings of 33rd PLEA International Conference: Design to Thrive, PLEA 2017*, 3(July), 5262–5269.
- Teotónio, I., Silva, C. M., & Cruz, C. O. (2021). Economics of green roofs and green walls: A literature review. *Sustainable Cities and Society*, 69(April 2020).
<https://doi.org/10.1016/j.scs.2021.102781>
- TheGreenAge UK. (2023). *Thermal conductivity, R-values and U-values simplified!*
<https://www.thegreenage.co.uk/article/thermal-conductivity-r-values-and-u-values-simplified/#:~:text=Using U-Values%2C R-Values and Thermal conductivity&text=Low numbers are good when,is more difficult to calculate.>
- Thomsen, K. E., Aggerholm, S., Enseling, A., Loga, T., Leutgöb, K., Rammerstorfer, J., Poland, B., & Witczak, K. (2013). *IMPLEMENTING THE COST-OPTIMAL METHODOLOGY IN EU COUNTRIES eceee – The European Council for an Energy Efficient Economy EuroACE – The European Alliance of Companies for Energy Efficiency in Buildings*. www.bpie.eu%5Cnwww.buildingsdata.eu
- Tian, Z., Zhang, X., Jin, X., Zhou, X., Si, B., & Shi, X. (2018). Towards adoption of building energy simulation and optimization for passive building design: A survey and a review. *Energy and Buildings*, 158, 1306–1316.
<https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.11.022>

- Torcellini, P., & Crawley, B. (2006). Understanding Zero-Energy Buildings. *ASHRAE Journal, September*, 63–69.
- Torcellini, P., & Pless, S. (2012). *Controlling Capital Costs in High Performance Office Buildings: A Review of Best Practices for Overcoming Cost Barriers*. May, 350–366.
<https://aceee.org/files/proceedings/2012/data/papers/0193-000091.pdf>
- Torcellini, P., Pless, S., Deru, M., & Crawley, D. (2006). Zero Energy Buildings: A Critical Look at the Definition. *ACEEE Summer Study Pacific Grove*, 15.
<http://www.nrel.gov/docs/fy06osti/39833.pdf>
- Torcellini, P., Pless, S., & Leach, M. (2014). A pathway for net-zero energy buildings: Creating a case for zero cost increase. *Building Research and Information*, 43(1), 25–33. <https://doi.org/10.1080/09613218.2014.960783>
- Ullah, K. R., Prodanovic, V., Pignatta, G., Deletic, A., & Santamouris, M. (2021). Technological advancements towards the net-zero energy communities: A review on 23 case studies around the globe. *Solar Energy*, 224(May), 1107–1126.
<https://doi.org/10.1016/j.solener.2021.06.056>
- UNCEA. (2012). *Le secteur des énergies renouvelables en Afrique du Nord Situation actuelle et perspectives*. 19.
- UNEP-SBCI. (2009). *Common Carbon Metric. For measuring Energy Use & reporting Greenhouse Gas Emissions from building operations*. 28.
<https://wedocs.unep.org/handle/20.500.11822/7922>
- US DOE. (2008). *Building Technologies Program, Planned Program Activities*.
<http://www1.eere.energy.gov/buildings/mypp.html>
- Valladares-Rendón, L. G., Schmid, G., & Lo, S. L. (2017). Review on energy savings by solar control techniques and optimal building orientation for the strategic placement of façade shading systems. *Energy and Buildings*, 140(71), 458–479.
<https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.12.073>
- Vera, S., Pinto, C., Tabares-Velasco, P. C., Bustamante, W., Victorero, F., Gironás, J., & Bonilla, C. A. (2017). Influence of vegetation, substrate, and thermal insulation of an extensive vegetated roof on the thermal performance of retail stores in semiarid and marine climates. *Energy and Buildings*, 146, 312–321.
<https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.04.037>
- Voss, K., Musall, E., & Lichtmeß, M. (2011). From low-energy to net zero-energy buildings: Status and perspectives. *Journal of Green Building*, 6(1), 46–57.
<https://doi.org/10.3992/jgb.6.1.46>

- Wang, P., Liu, Z., & Zhang, L. (2021). Sustainability of compact cities: A review of Inter-Building Effect on building energy and solar energy use. *Sustainable Cities and Society*, 72(December 2020), 103035. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2021.103035>
- Wei, W., & Skye, H. M. (2021). Residential net-zero energy buildings: Review and perspective. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 142(March), 110859. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.110859>
- Werndl, C. (2016). On Defining Climate and Climate Change. *British Journal for the Philosophy of Science*, 67(2), 337–364. <https://doi.org/10.1093/bjps/axu048>
- Widén, J., & Munkhammar, J. (2019). Solar Radiation Theory. In *Solar Radiation Theory*. <https://doi.org/10.33063/diva-381852>
- Williams, J., Mitchell, R., Raicic, V., Vellei, M., Mustard, G., Wismayer, A., Yin, X., Davey, S., Shakil, M., Yang, Y., Parkin, A., & Coley, D. (2016). Less is more: A review of low energy standards and the urgent need for an international universal zero energy standard. *Journal of Building Engineering*, 6, 65–74. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2016.02.007>
- Wilson, E. (2015). *Using BEopt to optimize home energy performance*. 32(August).
- Yuan, J., Farnham, C., & Emura, K. (2017). Inter-building effect and its relation with highly reflective envelopes on building energy use: Case study for cities of Japan. *Atmosphere*, 8(11). <https://doi.org/10.3390/atmos8110211>
- Zahraoui, Y., Basir Khan, M. R., Alhamrouni, I., Mekhilef, S., & Ahmed, M. (2021). Current status, scenario, and prospective of renewable energy in algeria: A review. *Energies*, 14(9). <https://doi.org/10.3390/en14092354>
- Zerroug, A. (2018). *Doctorat en Sciences Thème*.
- Zhao, J., & Du, Y. (2020). Multi-objective optimization design for windows and shading configuration considering energy consumption and thermal comfort: A case study for office building in different climatic regions of China. *Solar Energy*, 206(June), 997–1017. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2020.05.090>

ANNEXES

Annexe A : Questionnaire

Tableau A0.1 Questionnaire

Source : Auteur

INFORMATION GENERALE					
Quelle est votre tranche d'âge ?					
Où habitez-vous en permanence ?					
Êtes-vous ? (Genre)					
Quel est le plus haut niveau de qualification scolaire que vous avez atteint ?					
Avez-vous fait vos études en Algérie ?					
Quelle est votre situation professionnelle actuelle ?					
Veuillez choisir l'option qui décrit le mieux votre logement ?					
EFFET DE L'EFFICACITE ENERGETIQUE ET LA CONSOMMATION ENERGETIQUE DES BATIMENTS					
	Très faible	Faible	Moyen	Élevé	Très élevé
Comment évaluez-vous vos connaissances en matière d'efficacité énergétique ?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Comment évaluez-vous votre compétence à faire la différence entre énergie primaire et énergie d'utilisation ?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Comment évaluez-vous votre motivation pour réduire la consommation énergétique de vos projets ?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Le changement climatique et la préservation des ressources naturelles vous incitent-ils à réduire la consommation énergétique de vos projets ?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
L'économie sur les factures d'énergie vous incitent-elles à réduire la consommation d'énergie de vos projets ?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Suivez-vous la consommation énergétique de vos anciens projets ?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Utilisez-vous des logiciels de simulation énergétique dans la phase de conception de vos projets ?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Pensez-vous que la conception passive peut réduire la consommation d'énergie ? (Comme l'orientation, l'isolation...)	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Pensez-vous que la conception active peut réduire la consommation d'énergie ? (Comme l'utilisation de LED)	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
CHANGEMENTS CLIMATIQUES ET RECHAUFFEMENT PLANETAIRE					
Quelle est votre niveau de préoccupation par rapport au changement climatique actuels ?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
A quel point pensez-vous que le changement climatique affecte actuellement les gens dans le monde ?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
A quel point pensez-vous que le changement climatique affecte actuellement les gens en Algérie ?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
A quel point pensez-vous que le changement climatique va affecter les générations futures ?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

ANNEXES

Selon vous, à quel point le secteur du bâtiment affecte-t-il le changement climatique ?

LES ENERGIES RENOUVELABLES

Comment évaluez-vous vos connaissances en matière d'énergies renouvelables ?

Pensez-vous que l'énergie solaire est l'une des plus grandes ressources d'énergie renouvelable en Algérie ?

Pensez-vous que l'utilisation de l'énergie solaire est adaptée à votre région ?

Êtes-vous intéressé par l'installation de technologies d'énergie renouvelable dans votre propre maison ?

Êtes-vous intéressé par l'installation d'énergies renouvelables dans vos projets ?

Pensez-vous que les technologies d'énergie renouvelable sont bien connues du public ?

Souhaitez-vous obtenir plus d'informations sur les énergies renouvelables dans le futur proche ?

LA NET ZERO ENERGIE

Avant aujourd'hui, comment estimez-vous votre niveau de connaissance sur la net zéro ??

Selon vous, quelle est la probabilité que l'Algérie atteigne l'objectif de réduction à zéro ses émissions de carbone et sa consommation énergétique d'ici 2050 ?

Pensez-vous que la façon dont nous vivons devra changer considérablement pour faire face au changement climatique ?

Pensez-vous que la technologie permettra de réduire la plupart de nos émissions de carbone et de notre consommation énergétique, de sorte que la vie des gens n'aura pas à changer de manière substantielle.

Vous trouverez ci-dessous une liste de changements que nous pourrions intégrer au secteur du bâtiment pour réduire la consommation énergétique et les émissions de carbone en Algérie. Pour chacun d'entre eux, veuillez indiquer si vous souhaitez que ce changement se produise ou non.

Approvisionnement en énergie renouvelable (par exemple, moins de gaz et de combustibles fossiles, plus de parcs éoliens et de panneaux solaires)

Une meilleure efficacité énergétique (par exemple, installation d'une isolation et réduction de la consommation d'énergie dans les bâtiments)

Plus de technologies d'élimination des gaz à effet de serre (par exemple, développement de technologies permettant d'éliminer le carbone de l'atmosphère).

Une utilisation des sols plus respectueuse de l'environnement (par exemple, planter plus d'arbres.)

Une industrie plus verte (par exemple, des procédés de fabrication plus respectueux de l'environnement)

Moins de consommation générale (par exemple, acheter moins de produits neufs et plus d'articles recyclés et d'occasion).

ANNEXES

Réduction des déchets (par exemple, réduction des déchets de construction, moins d'emballages, augmentation du recyclage).	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	--------------------------	--------------------------	--------------------------	--------------------------	--------------------------

Selon vous, quelle est la part de responsabilité de chacun des acteurs suivants dans la réduction de la consommation énergétique, des émissions de carbone et d'atteinte d'un niveau net zéro en Algérie

Le grand public, en modifiant son mode de vie	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
-----------------------------------------------	--------------------------	--------------------------	--------------------------	--------------------------	--------------------------

Les entreprises et l'industrie, en faisant davantage pour réduire le niveau de consommation et d'émission.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
------------------------------------------------------------------------------------------------------------	--------------------------	--------------------------	--------------------------	--------------------------	--------------------------

Le gouvernement, en introduisant davantage de politiques visant à réduire le niveau de consommation et d'émission.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	--------------------------	--------------------------	--------------------------	--------------------------	--------------------------

En pensant à vos propres projets, veuillez indiquer dans quelle mesure vous êtes susceptible d'apporter les changements suivants au cours des années avenir :

Utilisation de la conception passive et bioclimatique.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
--------------------------------------------------------	--------------------------	--------------------------	--------------------------	--------------------------	--------------------------

Utilisation des énergies renouvelable	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
---------------------------------------	--------------------------	--------------------------	--------------------------	--------------------------	--------------------------

Utilisez un compteur intelligent pour surveiller votre consommation d'électricité/gaz.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
----------------------------------------------------------------------------------------	--------------------------	--------------------------	--------------------------	--------------------------	--------------------------

Utilisation des logiciels de simulation énergétique.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
------------------------------------------------------	--------------------------	--------------------------	--------------------------	--------------------------	--------------------------

Dans le futur proche dans quelle mesure souhaiteriez-vous :

Être interrogé par le gouvernement algérien sur vos préférences quant à la manière d'atteindre l'objectif "net zéro" ?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	--------------------------	--------------------------	--------------------------	--------------------------	--------------------------

Avoir votre mot à dire dans la prise de décision concernant les politiques climatiques et net zéro pour votre région/communauté locale et pour l'ensemble de votre pays ?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	--------------------------	--------------------------	--------------------------	--------------------------	--------------------------

Annexe B : Article publié

PROSTOR

30 [2022] 2 [64]

A SCHOLARLY JOURNAL OF ARCHITECTURE AND URBAN PLANNING
ZNANSTVENI CASOPIS ZA ARHITEKTURU I URBANIZAM

UNIVERSITY OF ZAGREB,
FACULTY OF ARCHITECTURE
SVEUCILIŠTE U ZAGREBU,
ARHITEKTONSKI FAKULTET

ISSN 1330-0652
<https://doi.org/10.31522/p>
CODEN PORREV
UDC 71/72
30 [2022] 2 [64]
139-212
7-12 [2022]

140-153 ABDELHAKIM WALID MAKHLOUFI SAMIRA LOUAFI

THE IMPACT OF GLAZING TYPES AND WINDOW-TO-WALL RATIOS ON ENERGY CONSUMPTION IN SEMI-ARID, MEDITERRANEAN AND ARID CLIMATES

[https://doi.org/10.31522/p.30.2\(64\).1](https://doi.org/10.31522/p.30.2(64).1)
UDC 692.822628.905.2(202.224551.4)85.4+212.52

 Af

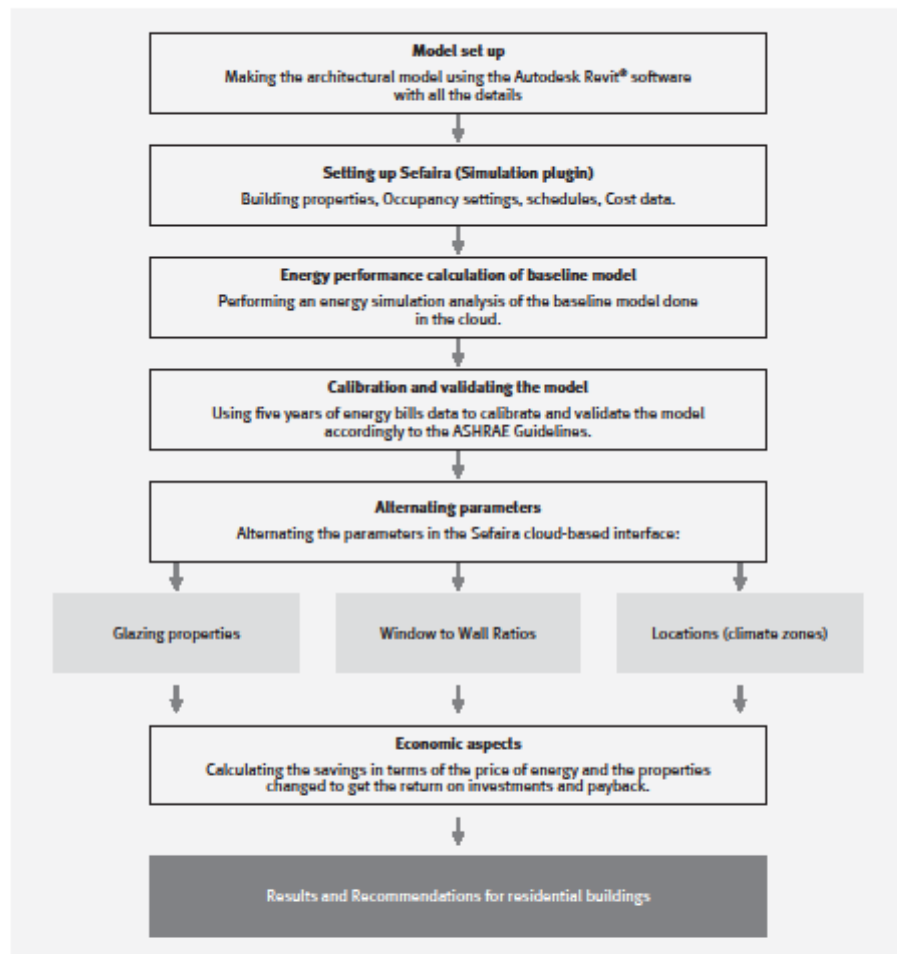


FIG. 1 SUMMARY OF THE METHODOLOGY USED

ABDELHAKIM WALID MAKHLOUFI¹, SAMIRA LOUAFI²

¹ DEPARTMENT OF ARCHITECTURE AND URBAN PLANNING, UNIVERSITY OF CONSTANTINE 3 – SALAH BOURNIDER, CONSTANTINE, ALGERIA.
PART OF LABORATORY OF BIOCLIMATIC ARCHITECTURE AND ENVIRONMENT (ABE), UNIVERSITY OF CONSTANTINE 3 – SALAH BOURNIDER, CONSTANTINE, ALGERIA
ORCID: orcid.org/0000-0001-5215-8158

² DEPARTMENT OF ARCHITECTURE AND URBAN PLANNING, UNIVERSITY OF CONSTANTINE 3 – SALAH BOURNIDER, CONSTANTINE, ALGERIA.
PART OF LABORATORY OF BIOCLIMATIC ARCHITECTURE AND ENVIRONMENT (ABE), UNIVERSITY OF CONSTANTINE 3 – SALAH BOURNIDER, CONSTANTINE, ALGERIA

walid.makhloufi@univ-constantine3.dz
samira.louafi@univ-constantine3.dz

PRELIMINARY COMMUNICATION

[https://doi.org/10.31522/p.30.2\(64\).1](https://doi.org/10.31522/p.30.2(64).1)

UDC 692.82:628.925.2(213.12+551.585.4+213.52)

TECHNICAL SCIENCES / ARCHITECTURE AND URBAN PLANNING

2.01.03. – ARCHITECTURAL STRUCTURES, BUILDING PHYSICS, MATERIALS AND BUILDING TECHNOLOGY

ARTICLE RECEIVED / ACCEPTED: 13. 9. 2022. / 20. 12. 2022.

THE IMPACT OF GLAZING TYPES AND WINDOW-TO-WALL RATIOS ON ENERGY CONSUMPTION IN SEMI-ARID, MEDITERRANEAN AND ARID CLIMATES

GLAZING TYPES
NET ZERO ENERGY
PAYBACK PERIOD
RESIDENTIAL BUILDINGS
WINDOW-TO-WALL RATIOS

A reduction in energy consumption and energy efficiency improvement in buildings have become one of the main objectives in national and international energy policies. In an optimization process, and in order to find the most influential parameters to achieve net zero energy, several ameliorations need to be made to residential buildings. In this paper, two measures are discussed; the effects of locally available glazing types and window-to-wall ratios, tested under three different Algerian climates; semi-arid, Mediterranean and arid-climate. For the purpose of calculating energy use intensity savings, optimal values and payback periods for each of the mentioned measures the building information modelling software Autodesk

Revit® and the energy simulation plugin Sefaira have been used. According to the findings, double glazing with Argon has the greatest potential for lowering the energy use intensity, whereas the window-to-wall ratios has a significant effect on the energy consumption of buildings in the studied climates, and the optimal ratio for a given orientation varies according to the type of glazing used. Moreover, very high payback periods were found compared to other countries, and only a few studied variables could be achieved with profitability. This paper is helpful for professionals who are responsible for decision-making during the design process of energy-efficient residential buildings.

Figure 0.1

INTRODUCTION

Global warming, resulting from increasing carbon emissions, has become the most pressing issue for the planet. The onset of the COVID-19 pandemic and its measures made people spend most of their daily lives indoors and use active comfort tools, pushing the building industry as one of the largest energy consumers in the world even further. Today this industry accounts for almost one third of the total energy consumption and CO₂ emissions (IEA, 2021). According to the International Energy Outlook (IEO), this consumption will increase by 42% by 2040 (EIA, 2016).

Mainly due to economic and population growth, energy demand is expected to be higher than ever in developing countries in Africa and Asia. In the meantime, energy efficiency technologies are not receiving sufficient attention. In Algeria, due to the shortage and lack of housing, typical and standard building production prevails in most regions and climate zones of the country (Ministère de l'Habitat, 1997). Either in relation to the type of architecture and design or the building materials, studies focus more on quantity rather than quality. Resulting in buildings far from those that would meet required criteria in terms of environmental issues or user needs. Consequently, the residential building sector is responsible for more than 30% of CO₂ emissions and 36.6% of the national final energy consumption, which reached 17.6 million TOE in 2020, with an increase of 17%

compared to 2017 (Ministère de l'énergie, 2020).

Nowadays, the reduction of energy consumption and the improvement of energy efficiency in buildings are mandatory objectives in energy policies at regional, national and international levels. The process of energy reduction went through several paradigms during the last century, such as bioclimatic, environmental, green, and sustainable architecture (Attia, 2016). It kept evolving in an attempt to lower energy consumption, with examples such as low energy buildings (BBC), high energy performance (HPE), passive house, up to neutral or positive energy buildings (BEPOS). The final objective of these concepts is buildings that can be self-sufficient in energy without relying on external sources.

Within this framework, the topic of the Net Zero Energy concept is receiving increasing attention in the building sector. Torcellini et al. define the Net Zero Energy Building as "a building that has reduced energy consumptions in order to be balanced between the energy demand and the energy supply from renewable energy technologies" (Torcellini et al., 2006). Albadry et al. also define it as a building with zero energy consumption over a year, with lowered electrical heating demands, and renewable energy supplies, and sum up the characteristics of NZEB stated by the EPBD, which are: a high energy efficient building with a demand for energy reduced to nearly zero or with very low energy demand, fulfilling the rest of it with renewable energy resources (Albadry, Tarabieh and Sewilam, 2017).

Nonetheless, it's not simple to tackle the building as a whole because it is composed of multiple components and layers. Treating each component individually is crucial to achieve high energy performance, and starting with the building envelope is the way to go. The envelope affects the energy flows in and out of the building, thus it should have a well-balanced ratio between its opaque and transparent elements (Marino, Nucara and Pietrafesa, 2017). Openings and windows, are used to afford views and daylight, as well as to provide good thermal enclosure for buildings, whereby they are regarded as one of the most important parts of the building envelope (Troup et al., 2019). Regardless of the regulatory frameworks that exist in Algeria (DTR C3.2/4), most building envelopes are not designed to fit the local climates nor the energy efficiency measures (Ministère de l'Habitat, 1997).

However, several studies investigating the glazing types have been carried out on an international stage. Lee et al. identified a num-

ber of window properties that should be studied, such as thermal transmittance (U-value), visible transmittance (TVIS), and solar heat gain coefficient (SHGC), and evaluated these properties with different WWR in five typical Asian climates (Shanghai, Seoul, Manila, Taipei, and Sapporo), resulting in a design guideline for selecting windows that are energy efficient and optimised for each climate (Lee *et al.*, 2013). Westphal's and Andreis's results have confirmed that energy consumption and performance are highly affected by the glazing properties and configuration. In MENA countries (Dubai UAE, Cairo Egypt and Algiers Algeria) Tarabieh *et al.* investigated three types of glazing that are supposed to be available on the market in order to seek out their performance and return in an office building. The results demonstrated that the SHGC was the most effective factor in saving energy compared to the U-value and pointed out that any study of energy efficiency should include the payback and return on investment to investigate the economical effectiveness of these energy efficiency measures (Tarabieh, Mashaly and Rashed, 2017). Hassouneh *et al.* pushed the research even further and analysed a variation of eight types of glazing to find the most appropriate type for an apartment building in Amman, Jordan and noted that the usage of different glazing types combination in each orientation can be more energy efficient (Hassouneh, Alshboul and Al-Salaymeh, 2010). In a similar way, Alhagla performed a series of simulations in the Egyptian climate and ascertained that different glazing types with higher U value and transmission tend to be more beneficial in terms of energy savings (Alhagla, Mansour and Elbassuoni, 2019). In a case study of a patient room located in Bologna Italy, Cesari *et al.* demonstrated that with the appropriate glazing properties such U-value and SHGC (around 1 to 2 $W\cdot m^{-2}\cdot K^{-1}$ and 0.55 respectively), the adoption of wider window glazing can be done, enabling a reduction and optimization of overall energy consumption and needs for both winter and summer (Cesari *et al.*, 2018).

Furthermore, previous simulation-based research and investigations tried to determine if window-to-wall ratios (WWR) have an impact on the energy efficiency of buildings, and if there is an optimal WWR for each climate, type, and function of the building. Troup *et al.* carried out a statistical investigation on the CBECS dataset in the USA and found that, on average, the EUI of buildings will increase accordingly to the increase of the WWR (Troup *et al.*, 2019). Cesari *et al.* confirmed that a higher percentage of WWR increases energy loads, but it can be significantly reduced when used with the appropriate shading system and glazing types (Cesari

et al., 2018). In this matter, Alsehall & Almhafdy pointed out that WWR is an essential factor in the energy and thermal performance of buildings, yet the study implies that it can be influenced by other factors such as climate, type of window, degree of insulation, shading devices and many more. In other words, modern glazing technologies can help to increase the value of WWR without increasing the energy consumption of a building to a certain state (Alsehall and Almhafdy, 2020). Westphal and Andreis also studied the influence of WWR and façade configuration in the energy consumption of air conditioning in five Brazilian locations and found that the WWR can be significantly increased when using a better glazing system in terms of U-value and SHGC, with a low impact on energy the consumption of buildings (Westphal and Andreis, 2016).

Several results about the effects of WWR in their respective climates can be found in the literature. Marino *et al.* investigated the existence of an optimal WWR for office buildings in twelve different cities in Italy and the differential impact of insulation features, luminaires, and switchable shading devices on this parameter. The results of various simulations showed that there is an optimal WWR between 23.5% and 25.9% but that there are no significant changes to the optimal WWR when the individual factors mentioned previously are used separately (Marino, Nucara and Pietrafesa, 2017). Harmaati and Magyar demonstrated that in the Serbian climate, an office building's energy consumption can be reduced by 83% when appropriate WWR and glazing types are used (Harmaati and Magyar, 2015). Chiesa *et al.* performed a similar series of simulations in office buildings with a constant rate of occupation for two different European climates (temperate and Mediterranean), and suggested that the optimal WWR can be found for both locations at around 30% (Chiesa *et al.*, 2019). Mahdavi *et al.* investigated the differential impact of WWR using parametric studies in the hot climate of Zahedan, Iran, and concluded that an optimal WWR of 40% with good orientation can reduce the energy consumption significantly and also has a potential of decreasing the carbon dioxide production to half (Mahdavi Adeli, Sarhaddi and Farahat, 2019). Chi *et al.* conducted a series of parametric changes in terms of orientations (18 intervals) and WWR (8 intervals) in China, to find their optimal values and their effects on indoor temperatures, daylight factors, and mean indoor air velocities and found that the optimal WWR for north and south walls is 40% and 35% respectively (Chi *et al.*, 2020).

More recent pieces of research have focused on the economic aspect of achieving the NZE

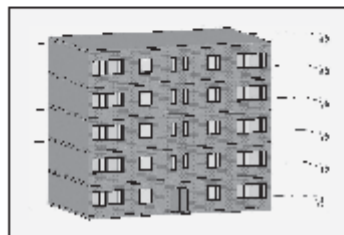
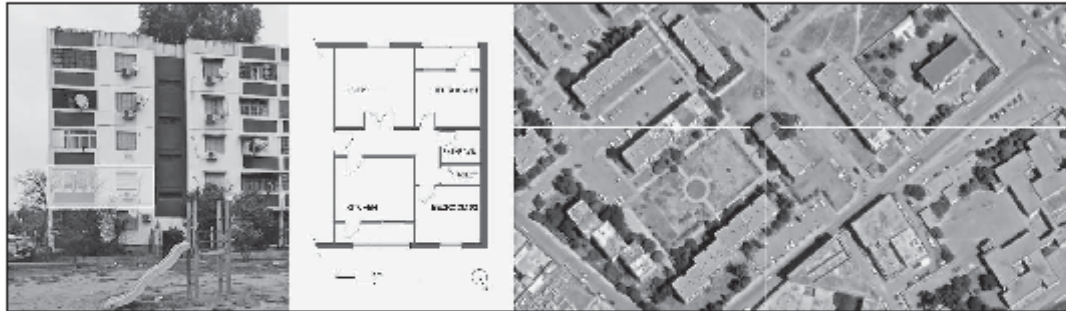


FIG. 2 CASE STUDY BUILDING: (A) CASE STUDY BUILDING FACADE REAL PICTURE, (B) PLAN OF THE CASE STUDY APARTMENT, (C) SITE PLAN WITH CASE STUDY BUILDING LOCATED

FIG. 3 SIMULATED BUILDING MODEL DEVELOPED USING REVIT

concept, as well as its strategies. Several researchers found that the cost issue is one of the biggest problems in achieving NZE buildings. There are only a few studies that investigated these cost barriers (Hu, 2019; Taherahmadi, Noorollahi and Panaht, 2021). Albadry et al. mentioned that saving money on projects is one of the motivators for investors to pursue advanced energy methods (Albadry, Tarabieh and Sewilam, 2017).

This paper aims to fill gaps in the knowledge about windows and fenestration elements such as the glazing type, window-to-wall ratios (WWR), and payback periods (PBP). The research was conducted in a residential building whose characteristics, configuration, and structure represent a typical and standard reference case of the Algerian building stock, in three different cities: Constantine, Algiers, Ghardaia, and different climate zones; semi-arid, Mediterranean, and arid. The first part of this research uses a simulation software, Sefaira plugin integrated to Autodesk Revit®, to gather information about the effects of locally available glazing types in different WWRs on energy consumption and energy use intensity and to seek out their optimal values. The second part aims to determine the financial return and the feasibility of such measures and find their optimal values accordingly to the economic aspect.

METHODS

• **General description** – In an optimization process, and in order to find the most influential parameters on energy consumption with the aim of achieving NZE residential buildings; several ameliorations need to be made. In this study, two measures were chosen. The usage of three different types of glazing, which are simple clear glazing, double clear glazing with no fill, and double clear glazing filled with Argon. The WWR varies from 10% to 90%. The study was conducted in three types of climates: semi-arid climate which

hosts the case study building in the city of Constantine, Mediterranean climate in the city of Algiers and arid climate in the city of Ghardaia. All with the purpose of calculating their EUI and return on Investment using Sefaira and Autodesk Revit®. Performing such a comparative analysis required the following work phases, as resumed in Fig. 1.

• **Description of the building case study** – A reference building was selected to conduct different building simulations, the case study is a simple rectangular multi-family residential building containing five levels and two apartments in each, as shown in Fig. 2 (a). Located in EL Khroub, Constantine, Algeria (coordinates: 36°15'20.7"N, 6°41'39.7"E, altitude: 603 m). The building is oriented 30° from the North/South axis. This building was chosen because it is one of the most common types of residential buildings in the Algerian territory. Each floor contains two apartments. The first one is a 75 m² apartment with two bedrooms, a kitchen, a living room, a bathroom and a toilet. The second one is an 85 m² apartment with three bedrooms, a kitchen, a living room, a bathroom and a toilet. The case study apartment illustrated in Fig. 2 (b) is a 75 m² apartment located on the second floor, containing a bedroom and a living oriented South/East, and another bedroom and a kitchen oriented North/East, with simple glazing aluminium windows and a WWR of 22%.

• **Simulation software** – The criteria for selecting the simulation tool and the modelling software were based upon the fact that glazing types and WWR are the main elements of this study. Because of its BIM benefits in automatically calculating areas and costs, as well as its widespread use and adoption among architecture firms, students, and professionals, Autodesk Revit® was chosen as the modelling software. It was used in combination with the simulation tool Sefaira, which is based on EnergyPlus, and offers a simple workflow, the ability to change parameters,

TABLE I THE MAIN SIMULATION BUILDING'S CHARACTERISTICS

		Thickness in m	λ Thermal Conductivity in $W m^{-1}K^{-1}$	R Thermal Resistance in m^2K/W	U-Value in $W m^{-2}K^{-1}$
External wall	Plester	0.02	0.25	0.06	0.25
	Hollow Brick	0.1	0.48	0.21	
	Air gap	0.05	0.11	0.45	
	Hollow Brick	0.15	0.48	0.21	
	Cement	0.02	1.15	0.02	
Internal wall	Plester	0.02	0.25	0.06	3.10
	Hollow Brick	0.1	0.48	0.21	
	Plester	0.02	0.25	0.06	
Floor	Floor tile	0.02	2.1	0.02	5.63
	Mortar	0.02	1.15	0.02	
	Slab	0.2	1.45	0.14	
	Mortar	0.02	1.15	0.02	
Roof	bitumen	0.02	0.23	0.02	4.13
	Slab	0.2	1.45	0.14	
	Mortar	0.02	1.15	0.02	
Windows	Aluminium	0.10	/	/	5.68

TABLE II OCCUPANCY AND OPERATION SCHEDULES

Issue	Seflra settings
Occupant density	15.0 m ² /person
Equipment power density	15.0 W/m ²
Light power density	8.6 W/m ²
Heating setpoint temperature	20 C°
Cooling setpoint temperature	28 C°
Outside air rate/person	8.1 L/s/person
Infiltration	1.45 L/s-m
Operating hours	24h/24h
Days Schedules	7 days per week

and the ability to simulate on a cloud-based platform.

- **Simulation model characteristics** – The main simulation building's characteristics cited in Table I are the most commonly ones used in the Algerian territory according to the (DTR C3.2/4) and to the case study (Ministère de l'Habitat, 1997). They will remain unchanged in different simulation variations only to seek out the effect of the location, glazing types, and WWR on the energy behaviour of the building, which is the main focus of the study.

- **Occupancy and operation schedules** – The occupancy and operations schedules used are resumed in Table II.

- **Simulation variables: Glazing types, WWR** – The aim of this research is to seek out the differences between using various types of

windows both in terms of energy and economic savings, as well as to verify the existence of an optimal value of the ratio of the glazed surface (S_g) to the wall surface (S_w) defined in Eq. (1) with an equal interval of 10% from 0.1 (10%) to 0.9 (90%).

$$WWR = \frac{S_g}{S_w} \quad (1)$$

After conducting several interviews with window manufacturers in local markets, we concluded that the three most common types of windows and glazing used in Algerian residential buildings and easily available on the local market are: simple clear glazing, double clear glazing without gas fill, and double clear glazing with Argon fill. Both windows with krypton gas and triple glazing windows are neither used nor found on the market. We conducted our research to alternate between

TABLE III TYPE OF WINDOWS USED IN THE SIMULATIONS



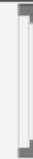
	Single Glazing Window (Simple)	Double Clear Glazing Window with No Fill (Double)	Double Clear Glazing Window with Argon (Double Ar)
Section			
Specification	6 mm Clear	4 mm Clear / 16 mm Air / 4 mm Clear	4 mm Clear / 16 mm Argon / 4 mm Clear
U-Value in $W m^{-2}K^{-1}$	5.68	2.83	1.40
SHGC	0.90	0.74	0.61
Tvis	0.85	0.80	0.60



Fig. 4 LOCATION OF THE STUDIES CITIES

TABLE IV CLIMATIC CONDITIONS IN STUDIED CITIES

	Altitude (m)	Gh (kWh/m ²)	Dh (kWh/m ²)	Bn (kWh/m ²)	Ta (°C)	Td (°C)	FF (m/a)	RR (mm)	RD (days)
Constantine	650	1724	673	1791	15.9	8.4	3.6	485	94
Algiers	25	1659	740	1538	18	12.7	2.8	600	92
Ghardaia	468	1983	722	2055	22.7	5.1	3.6	145	33

the different types that are commonly found on the market, illustrated in Table III.

Furthermore, the purpose of the proposed energy analysis is to calculate the changes and variations that these values of WWR and glazing types might undergo under different weather and climate conditions.

• **The weather conditions** – Taking into consideration its vast territory and altitude disparity, as well as different climate zones in Algeria, three cities were chosen for this study as illustrated in Fig. 4. Constantine, Algiers and Ghardaia which represents semi-arid, Mediterranean and arid climates respectively. The climate data and elevations were imported from the climatological software Metronome 8 as shown in Table IV.

The first climate zone is the location of the case study building, which is in the city of Constantine, specifically in El khroub 36° 16' 00" N, 6° 41' 00" E, 650m altitude, with a semi-arid climate. This climate is characterised by large temperature oscillations; hot and humid in summer and cold and wet in winter, where the average temperature and precipitations are 15.6 °C and 469 mm. The second climate zone is a Mediterranean climate represented by the city of Algiers 36° 46' 34" N, 3° 03' 36" E, which is characterized by a warm and dry summer with high humidity, and a mild winter with 18.2 °C as a yearly average temperature, alongside with high precipitations with a mean of 615 mm per year. For the third city of Ghardaia the climate is arid, characterised by a hot and dry summer with high temperature differences between day and night, as well as between summer and winter. The average temperature is 21.1 °C and the precipitation is rare, with an average of 66 mm per year.

• **Model calibration and validation** – In order to produce correct results and validate the energy simulation, the outputs of the simulation tool, including energy consumption and demand, were compared with the values obtained from five years of utility bills from the case study building. The validation was done according to the recommendations of the ASHRAE Guideline 14-2014 (ASHRAE, 2014), using both Mean Bias Error (MBE) and Coefficient of Variation of the root mean squared error value to calculate the level of potential error between the measured and

predicted data. The methodology of calibration and validation was developed using Eq (2) and Eq (4).

$$MBE = \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{pred,i} - Q_{meas,i})}{n Q_{meas}} \quad (2)$$

$$RMSE = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^n (Q_{pred,i} - Q_{meas,i})^2}}{n} \quad (3)$$

$$CV(RMSE) = \frac{RMSE}{Q_{meas}} = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^n (Q_{pred,i} - Q_{meas,i})^2}}{n Q_{meas}} \quad (4)$$

Where:

MBE: Mean Bias Error

RMSE: Root Mean Squared Error

CV(RMSE): Coefficient of Variation of the root mean squared error

$Q_{pred,i}$: predicted value during period i

$Q_{meas,i}$: measured value during period i

Q_{meas} : measured avg during the period

In our case, the measurements of the MBE and CV(RMSE) were conducted and we achieved the results resumed in Table V.

• **Payback period (PBP)** – As stated by previous studies, the cost and the economic aspect are one of the greatest obstacles to the achievement of NZE buildings, making money savings the Investors' motivator to pursue advanced energy methods, with only a few papers studying these aspects compared to environmental and comfort criteria (Hu, 2019) (Taherhmadli, Noorollahi and Panahi, 2021). (Albadry, Tarabieh and Sewilam, 2017). The payback period (PBP) study was chosen to establish whether or not different alternatives are profitable. The PBP can be calculated with the Eq (5), using the costs of the Initial Investment (USD and DZD), divided by annual savings or benefits (USD/year or DZD/year), which can be resumed through the following formula:

$$PBP = \frac{\text{Initial Investment (yearly)}}{\text{Annual savings}} \quad (5)$$

In our case the Initial Investment is the window type prices and the annual savings or benefits in terms of energy from changing dif-

TABLE V MODEL CALIBRATION ACCORDING TO ASHRAE GUIDELINE 14-2014

	MBE	(CV)RMSE
ASHRAE Guidelines 14-2014	±5%	±15%
Error value of the model	-0.26%	6%

TABLE VI ALGERIAN ENERGY PRICES IN DZD AND USD

Type / Price	DZD	USD
Electricity	4.179	0.0297
Gas	0.374	0.0023

TABLE VII TYPE OF WINDOWS PRICES

(a) Prices in DZD						
Type / Price	Price 01	Price 02	Price 03	Price 04	Price 05	Average
Single Clear	16000	15000	15000	14000	19000	15800
Double Clear	20000	19000	22000	16500	22000	19900
Double Clear with Argon	22000	20500	22500	17500	23000	21100
(b) Prices in USD						
Type / Price	Price 01	Price 02	Price 03	Price 04	Price 05	Average
Single Clear	113.6	106.5	106.5	99.4	134.9	112.58
Double Clear	142	134.9	156.2	117.35	156.2	141.29
Double Clear with Argon	156.2	145.55	159.75	124.25	163.3	149.81

ferent types of windows are calculated with the help of energy simulation and then multiplied by the price of energy. This can be summarised with Eq (6).

$$\text{Annual Savings} = \text{Energy savings} \times \text{Cost of energy} \quad (6)$$

For the calculation of energy prices Algerian government rates were used as demonstrated in Table VI.

To get an accurate and average price for the three types of windows, different local window manufacturers were asked for their prices for the square meter, and the results are illustrated in Table VII.

• **Profitability (P)** – To find out if the changes made are worth it economically, profitability (P) should be calculated, considering the building's life cycle and windows life span (BL), in our case, 30 years were considered together with its PBP. P is determined by Eq (7).

$$P = \frac{BL - PBP}{BL} (\text{years}) \quad (7)$$

With:

BL: Building life (years);

PBP: Payback period (years).

RESULTS AND DISCUSSION

GLAZING TYPE

The energy analysis simulation showed that in the semi-arid climate of Constantine, replacing a single clear glazing window with a double clear glazing window with an air gap ensures a saving of 20.81 kWh/m²/y and using double clear glazing filled with Argon gas, increases the savings to 30.77 kWh/m²/y, which means that the savings in total will be

1560.75 and 2307.5 kWh per year respectively, scoring the highest benefits in comparison with other climates.

However, changing the locations to the Mediterranean climate, Algiers in this case, using the same two design variables made a saving of 5.8 kWh/m²/y and 9.85 kWh/m²/y which means 435 and 738.75 kWh yearly savings, respectively.

In the last case scenario, using the arid climate of Ghardala, the previous variables change, resulting in a saving of 7.63 kWh/m²/y made for the double clear glazing windows, which equals 572.25 kWh yearly and 13.52 kWh/m²/y for the double clear glazing windows filled with Argon gas, which equals 1014 kWh yearly.

These findings in the three different climates confirm that in terms of energy savings double clear glazing windows with Argon gas are the optimal option, followed by the double clear glazing windows with no fill, and in the last place come the simple glazing windows. Thus, there isn't a big difference between the double clear glazing windows with no fill and the double clear glazing windows with Argon gas. Its maximum is reached in the semi-arid climate of Constantine with a value of 9.96 kWh/m²/y and its minimum in the Mediterranean climate of Algiers with a value of 4.05 kWh/m²/y, which means respectively 747 and 303.75 kWh yearly, confirming the findings in other studies like (Tarabieh, Mashaly and Rashed, 2017) and (Alhagla, Mansour and Elbassuoni, 2019).

WINDOW-TO-WALL RATIO

Multiple energy simulations were carried out to find the most suitable WWR Eq. (5) with

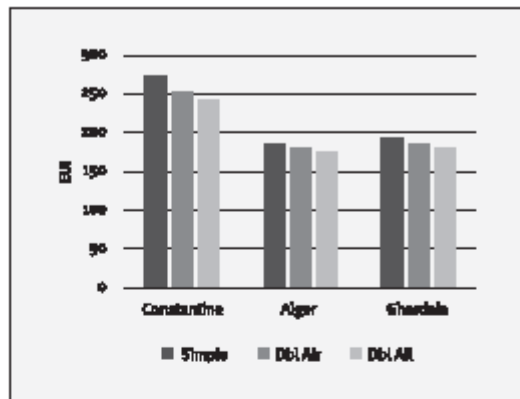


FIG. 5 EUI FOR TYPES OF GLAZING IN THE STUDIED CLIMATES

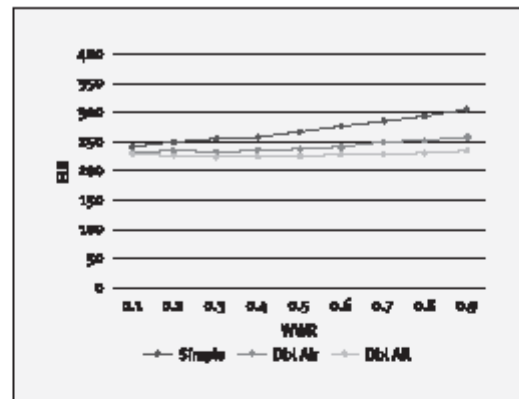


FIG. 6 EUI OF DIFFERENT WWRs IN THE SEMI-ARID CLIMATE

equal intervals from 0.1 (10%) to 0.9 (90%) for the three types of window glazing.

For the semi-arid climate simple glazing windows show that minimum energy consumption can be reached with 10% WWR and a linear relationship with the EUI. A large difference in consumption can be seen between greater and smaller WWR percentages (10% and 90%), reaching a maximum of 63 kWh/m²/y (4725 kWh yearly). Using the double clear glazing windows with no fill as an alternative can decrease the overall EUI for different values, and reduce the difference between the minimum and maximum WWR to approximately half in comparison with simple glazing windows at 29 kWh/m²/y (2175 kWh yearly).

The second alternative, which is double clear glazing windows filled with Argon gas, has the optimum energy consumption decrease potential. It decreases the overall energy consumption and the difference between the smallest and biggest WWR percentages (10% and 90%), to only 6 kWh/m²/y, which is 450 kWh yearly.

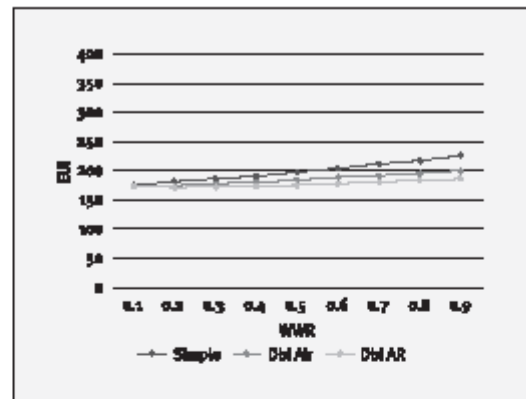
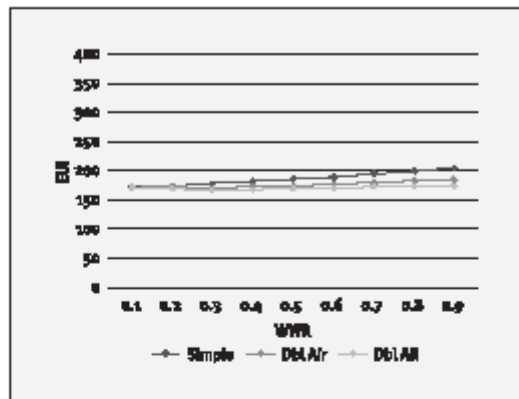
The results obtained from the Mediterranean climate show that there are no significant differences between different types of glazing windows in the lowest WWR values, with a 1.96 kWh/m²/y difference between simple glazing and double clear glazing (147 kWh yearly), and 2.32 kWh/m²/y difference between simple glazing and double clear glazing with Argon (174 kWh yearly).

Interestingly, the EUI of the double clear glazing windows with no fill and the double clear glazing windows with Argon gas were observed to be decreasing from 10% until reaching their peak at 30% and 40%, with a saving of 0.62 kWh/m²/y (46.5 kWh yearly) and 4.13 kWh/m²/y (309.75 kWh yearly) respectively.

In the same way, the results from the arid climate show similarities with the previous climates as it has almost the same EUI in smaller WWR with a small difference of 2.74 kWh/m²/y (205.5 kWh yearly) for the double clear glazing windows with no fill and 3.79 kWh/m²/y (284.25 kWh yearly) for the double glazing windows with Argon gas. Only for this climate did the double glazing windows with Argon gas reduce the EUI until reaching a WWR of 30%, making a saving of 0.62 kWh/m²/y (46.5 kWh yearly).

These results suggest that in the three different climates the simple clear glazing window is the one achieving the least energy consumption reduction, and that the two others types are close in their energy efficiency, which further supports the idea that there are differences between the energy consumption compartment in the three climates when used with different types of glazing and WWRs as found in several other studies such as: Tarabieh, Mashaly and Rashed, 2017; Alhagla, Mansour and Elbassouni, 2019; Troup *et al.*, 2019; Marino, Nucara and Pietrafesa, 2017.

As in the semi-arid climate with the smallest WWR of 10% in this case, there is a slight difference between single glazing and the two other double types of glazing. In other words, it's clear that for single glazing the optimal WWR is the lowest one as energy consumption keeps rising when we increase the WWR. Thus, there is a part between 30% and 40% where it stabilizes. It seems that there is only a slight difference for the double glazing types with 10%. This gap will increase when the WWR increases. We can notice that the optimal WWR for the double clear glazing window with no fill is 30% while it's 40% for the double clear glazing window with Argon gas. It is somewhat surprising that energy



consumption with different WWRs doesn't increase a lot when the double clear glazing window with Argon gas is used. These findings can suggest that this type is most suitable when high WWRs are needed.

For the Mediterranean climate it seems that the results are much closer for all three types of glazing. The single glazing optimum WWR can be increased with 10% to reach 20% in comparison with the semi-arid climate, but the optimal WWR for the double glazing remains the same at 30% and 40% for the double clear glazing windows with no fill and the double clear glazing windows with Argon gas respectively. This finding confirms that double clear glazing windows with argon gas keep energy consumption stable with different WWRs and have the smallest gap between the greatest and smallest WWR compared to the other two climates.

For the arid climate, the results show some similarities in the pattern of energy consumption but have some differences in terms of optimal WWR. As we can see, the optimal WWR for both single and double clear glazing windows is 10%, while we can reach a 30% value for the double clear glazing windows with Argon gas. We can also notice that the double clear glazing windows with Argon gas has the biggest gap in energy consumption between 10% and 90% WWR, which is double in comparison to what we found in the semi-arid climate and almost four times the results of the Mediterranean climate.

PAYBACK PERIOD

- Payback period for Constantine – When analysing the PBP data for the city of Constantine, which has a semi-arid climate, we can notice that the PBP is smallest when en-

ergy is set to the electricity price (in the case of using an electricity-powered HVAC system), with a peak reaching 7.31 years, and the highest payback time is when it is set to the gas price (in the case of using a gas-powered HVAC system) with a peak reaching 95.33 years. When the energy price is set to accommodate the energy mixture in the Algerian HVAC systems, as a combination of gas and electricity, the PBP is between the two previous results, reaching 28.99 years at its maximum. Interestingly, as far as the glazing types go, it seems that the double clear glazing windows filled with Argon gas have the shortest payback time when compared to the double simple glazing windows with no fill. This is with the three types of energy prices (Table VIII).

- Payback period for Algiers – For the city of Algiers and the Mediterranean climate, it is apparent from these tables that the payback time is really high, reaching astronomic results for the gas price table (342.04 years at its peak) and 19.96 years at its lowest point when calculated with electricity. For the type of glazing, it seems that the double clear glazing windows filled with Argon gas show the best results in terms of payback for the three types of energy usage methods (Table IX).

- Payback period for Ghardaïa – The results for the city of Ghardaïa and its arid climate indicate similar results, with electrical energy showing the best payback time with a peak of 19.93 years compared to the two other types of energy, reaching 79.07 and 260.01 years for gas and the mixed energy type. Turning now to the glazing type, the double glazing windows filled with Argon gas have the best payback time for the three types of energy reaching 14.54 years at its best for electricity and 189.70 years at its maximum for gas (Table X).

FIG. 7 EUI OF DIFFERENT WWRs IN THE MEDITERRANEAN CLIMATE

FIG. 8 EUI OF DIFFERENT WWRs IN THE ARID CLIMATE

TABLE VIII PAYBACK PERIOD CALCULATIONS FOR THE SEMI-ARID CLIMATE OF CONSTANTINE

	EUI kWh/m ² /y	Saving per m ²	Yearly Savings in kWh	Price per m ²	Glazing Area m ²	Window Prices in \$	Price Difference in \$	Price Electricity in \$	Payback for new in years	Payback in years
Simple	274.12	/	/	112.18	11.76	1,339.24	/	/	/	/
Double	253.31	20.8	1960.8	141.28	11.76	1,661.45	347.22	46.82	25.48	7.31
Double Ar	243.35	30.8	2307.8	149.80	11.76	1,761.65	447.41	69.23	25.45	6.39
	EUI kWh/m ² /y	Saving per m ²	Yearly Savings in kWh	Price per m ²	Glazing Area m ²	Window Prices in \$	Price Difference in \$	Price Electricity in \$	Payback for new in years	Payback in years
Simple	274.12	/	/	112.18	11.76	1,339.24	/	/	/	/
Double	253.31	20.8	1960.8	141.28	11.76	1,661.45	347.22	2.59	462.84	95.23
Double Ar	243.35	30.8	2307.8	149.80	11.76	1,761.65	447.41	5.21	331.90	83.35
	EUI kWh/m ² /y	Saving per m ²	Yearly Savings in kWh	Price per m ²	Glazing Area m ²	Window Prices in \$	Price Difference in \$	Price Electricity in \$	Payback for new in years	Payback in years
Simple	274.12	/	/	112.18	11.76	1,339.24	/	/	/	/
Double	253.31	20.8	1960.8	141.28	11.76	1,661.45	347.22	11.80	140.75	28.99
Double Ar	243.35	30.8	2307.8	149.80	11.76	1,761.65	447.41	17.45	100.93	25.35

TABLE IX PAYBACK PERIOD CALCULATIONS FOR THE MEDITERRANEAN CLIMATE OF ALGIERS

	EUI kWh/m ² /y	Saving per m ²	Yearly Savings in kWh	Price per m ²	Glazing Area m ²	Window Prices in \$	Price Difference in \$	Price Electricity in \$	Payback for new in years	Payback in years
Simple	185.42	/	/	112.18	11.76	1,339.24	/	/	/	/
Double	179.62	5.8	435	141.28	11.76	1,661.45	347.22	13.05	127.31	26.32
Double Ar	175.57	9.85	738.75	149.80	11.76	1,761.65	447.41	22.16	79.49	19.96
	EUI kWh/m ² /y	Saving per m ²	Yearly Savings in kWh	Price per m ²	Glazing Area m ²	Window Prices in \$	Price Difference in \$	Price Electricity in \$	Payback for new in years	Payback in years
Simple	185.42	/	/	112.18	11.76	1,339.24	/	/	/	/
Double	179.62	5.8	435	141.28	11.76	1,661.45	347.22	1.00	1660.62	342.04
Double Ar	175.57	9.85	738.75	149.80	11.76	1,761.65	447.41	1.70	1096.80	260.38
	EUI kWh/m ² /y	Saving per m ²	Yearly Savings in kWh	Price per m ²	Glazing Area m ²	Window Prices in \$	Price Difference in \$	Price Electricity in \$	Payback for new in years	Payback in years
Simple	185.42	/	/	112.18	11.76	1,339.24	/	/	/	/
Double	179.62	5.8	435	141.28	11.76	1,661.45	347.22	3.39	505.02	104.02
Double Ar	175.57	9.85	738.75	149.80	11.76	1,761.65	447.41	5.59	315.30	79.18

TABLE X PAYBACK PERIOD CALCULATIONS FOR THE ARID CLIMATE OF GHARDAIA

	EUI kWh/m ² /y	Saving per m ²	Yearly Savings in kWh	Price per m ²	Glazing Area m ²	Window Prices in \$	Price Difference in \$	Price Electricity in \$	Payback for new in years	Payback in years
Simple	193.34	/	/	112.18	11.76	1,339.24	/	/	/	/
Double	185.71	7.63	572.25	141.28	11.76	1,661.45	347.22	17.17	96.78	19.93
Double Ar	179.82	13.52	1014	149.80	11.76	1,761.65	447.41	30.42	57.91	14.54
	EUI kWh/m ² /y	Saving per m ²	Yearly Savings in kWh	Price per m ²	Glazing Area m ²	Window Prices in \$	Price Difference in \$	Price Electricity in \$	Payback for new in years	Payback in years
Simple	193.34	/	/	112.18	11.76	1,339.24	/	/	/	/
Double	185.71	7.63	572.25	141.28	11.76	1,661.45	347.22	1.27	1262.33	260.01
Double Ar	179.82	13.52	1014	149.80	11.76	1,761.65	447.41	2.33	755.36	189.70
	EUI kWh/m ² /y	Saving per m ²	Yearly Savings in kWh	Price per m ²	Glazing Area m ²	Window Prices in \$	Price Difference in \$	Price Electricity in \$	Payback for new in years	Payback in years
Simple	193.34	/	/	112.18	11.76	1,339.24	/	/	/	/
Double	185.71	7.63	572.25	141.28	11.76	1,661.45	347.22	4.33	383.89	79.07
Double Ar	179.82	13.52	1014	149.80	11.76	1,761.65	447.41	7.67	229.71	57.69

TABLE VIII PAYBACK PERIOD CALCULATIONS FOR THE SEMI-ARID CLIMATE OF CONSTANTINE

	EUI kWh/m ² /y	Saving per m ²	Yearly Savings in kWh	Price per m ²	Glazing Area m ²	Window Prices in \$	Price Difference in \$	Price Electricity in \$	Payback for new in years	Payback in years
Simple	274.12	/	/	112.18	11.76	1,239.24	/	/	/	/
Double	253.31	20.8	1960.8	141.28	11.76	1,661.45	342.22	46.82	25.48	7.31
Double Ar	243.35	30.8	2307.8	149.80	11.76	1,761.65	442.41	69.72	25.45	6.29
	EUI kWh/m ² /y	Saving per m ²	Yearly Savings in kWh	Price per m ²	Glazing Area m ²	Window Prices in \$	Price Difference in \$	Price Electricity in \$	Payback for new in years	Payback in years
Simple	274.12	/	/	112.18	11.76	1,239.24	/	/	/	/
Double	253.31	20.8	1960.8	141.28	11.76	1,661.45	342.22	3.59	462.84	95.33
Double Ar	243.35	30.8	2307.8	149.80	11.76	1,761.65	442.41	5.31	331.90	83.35
	EUI kWh/m ² /y	Saving per m ²	Yearly Savings in kWh	Price per m ²	Glazing Area m ²	Window Prices in \$	Price Difference in \$	Price Electricity in \$	Payback for new in years	Payback in years
Simple	274.12	/	/	112.18	11.76	1,239.24	/	/	/	/
Double	253.31	20.8	1960.8	141.28	11.76	1,661.45	342.22	11.80	140.75	28.99
Double Ar	243.35	30.8	2307.8	149.80	11.76	1,761.65	442.41	17.45	100.92	25.35

TABLE IX PAYBACK PERIOD CALCULATIONS FOR THE MEDITERRANEAN CLIMATE OF ALGERIS

	EUI kWh/m ² /y	Saving per m ²	Yearly Savings in kWh	Price per m ²	Glazing Area m ²	Window Prices in \$	Price Difference in \$	Price Electricity in \$	Payback for new in years	Payback in years
Simple	185.42	/	/	112.18	11.76	1,239.24	/	/	/	/
Double	179.62	5.8	4.35	141.28	11.76	1,661.45	342.22	13.05	127.31	26.22
Double Ar	175.57	9.85	738.75	149.80	11.76	1,761.65	442.41	22.16	79.49	20.96
	EUI kWh/m ² /y	Saving per m ²	Yearly Savings in kWh	Price per m ²	Glazing Area m ²	Window Prices in \$	Price Difference in \$	Price Electricity in \$	Payback for new in years	Payback in years
Simple	185.42	/	/	112.18	11.76	1,239.24	/	/	/	/
Double	179.62	5.8	4.35	141.28	11.76	1,661.45	342.22	1.00	1660.62	342.04
Double Ar	175.57	9.85	738.75	149.80	11.76	1,761.65	442.41	1.70	1026.80	260.28
	EUI kWh/m ² /y	Saving per m ²	Yearly Savings in kWh	Price per m ²	Glazing Area m ²	Window Prices in \$	Price Difference in \$	Price Electricity in \$	Payback for new in years	Payback in years
Simple	185.42	/	/	112.18	11.76	1,239.24	/	/	/	/
Double	179.62	5.8	4.35	141.28	11.76	1,661.45	342.22	3.29	505.02	104.02
Double Ar	175.57	9.85	738.75	149.80	11.76	1,761.65	442.41	5.59	315.30	79.18

TABLE X PAYBACK PERIOD CALCULATIONS FOR THE ARID CLIMATE OF GHARDAÏA

	EUI kWh/m ² /y	Saving per m ²	Yearly Savings in kWh	Price per m ²	Glazing Area m ²	Window Prices in \$	Price Difference in \$	Price Electricity in \$	Payback for new in years	Payback in years
Simple	192.34	/	/	112.18	11.76	1,239.24	/	/	/	/
Double	185.71	7.63	572.25	141.28	11.76	1,661.45	342.22	17.17	96.78	20.92
Double Ar	179.82	13.52	1014	149.80	11.76	1,761.65	442.41	30.42	57.91	14.54
	EUI kWh/m ² /y	Saving per m ²	Yearly Savings in kWh	Price per m ²	Glazing Area m ²	Window Prices in \$	Price Difference in \$	Price Electricity in \$	Payback for new in years	Payback in years
Simple	192.34	/	/	112.18	11.76	1,239.24	/	/	/	/
Double	185.71	7.63	572.25	141.28	11.76	1,661.45	342.22	1.32	1262.33	261.01
Double Ar	179.82	13.52	1014	149.80	11.76	1,761.65	442.41	3.23	755.26	189.70
	EUI kWh/m ² /y	Saving per m ²	Yearly Savings in kWh	Price per m ²	Glazing Area m ²	Window Prices in \$	Price Difference in \$	Price Electricity in \$	Payback for new in years	Payback in years
Simple	192.34	/	/	112.18	11.76	1,239.24	/	/	/	/
Double	185.71	7.63	572.25	141.28	11.76	1,661.45	342.22	4.23	383.89	79.07
Double Ar	179.82	13.52	1014	149.80	11.76	1,761.65	442.41	7.67	229.71	57.69

TABLE XI PROFITABILITY IN THE STUDIED CLIMATES

		Electricity Energy			Gas Energy			Mixture (81% Gas; 19% Electricity)		
		BL in years	PBP in years	P	BL in years	PBP in years	P	BL in years	PBP in years	P
Constantine	Double	30	7.31	76%	30	95.33	-218%	30	28.99	3%
	Double Ar	30	6.39	79%	30	82.25	-178%	30	25.25	16%
Algiers	Double	30	26.22	13%	30	342.04	-1040%	30	104.02	-147%
	Double Ar	30	19.06	32%	30	260.28	-768%	30	79.18	-164%
Ghardaia	Double	30	19.03	34%	30	260.21	-767%	30	79.07	-164%
	Double Ar	30	14.54	52%	30	189.70	-532%	30	57.69	-92%

TABLE XII PAYBACK PERIOD OF ALGERIA COMPARED TO FRANCE AND USA IN USD

	EUI kWh/m ² /y	Total Saving kWh yearly	Price kWh of energy FR in \$	Price kWh of energy US in \$	Price kWh of energy DZ in \$	Price Window per m ² (FR) in \$	Price Window per m ² (USA) in \$	Price Window per m ² (DZ) in \$	Payback FR in years	Payback US in years	Payback DZ in years
Simple	274.12	/				79.45	100	135.53	/	/	/
Double	252.21	1560.75	0.200	0.109	0.008	130.53	150	145.64	1.92	3.46	28.99
Double Ar	243.25	2307.75				227.01	255.06	198.54	3.76	7.25	25.25

It is worth noting that in all of the climates studied, there is a significant difference in the payback periods depending on the type of energy: electricity, gas, and a combination of both, which can be explained by the difference in prices, as electricity costs thirteen times more than gas. Surprisingly, when compared to each other, the results indicate that the semi-arid climate of Constantine is the one with the shortest payback period, followed by Ghardaia and then last comes the Algiers climate. For all these climates and with the three types of energy the double clear glazing windows with Argon gas seem to be the most suitable option with the shortest payback period overall.

PROFITABILITY

Interestingly, with electrical energy, the results obtained showed really good profitability possibility with the different climates and glazing types, with the best results for the city of Constantine, reaching a 79% P for the double clear glazing windows with Argon gas, and the worst for the city of Algiers, amounting to a 13% P for the double clear glazing windows with no fill. However, for gas all these results were negative. None of the cities nor the glazing types could achieve profitability, reaching a peak of -1040% for the double clear glazing windows with no fill in the city of Algiers and a minimum of -178% for the double clear glazing windows with Argon gas in the city of Constantine. For the last type of energy combination, it is apparent from the table that only a few of the results can be profitable for the city of Constantine with barely minimum results. Further results are summarised in Table XI.

COMPARISON TO OTHER COUNTRIES

As seen on the field and in the literature review, developing countries are far behind in terms of the usage of energy saving technologies (passive or active). An investigation was made to seek out the different prices for energy and windows in different parts of the world, more specifically in France as a representative country of Europe and the United States of America as a representative of America, as summarised in Table XII. This comparison was made to point out the difference in payback times between developed and developing countries and to see if it is one of the points that is keeping these countries from using more energy savings strategies when comparing them to our previous research results. One unanticipated finding was that Algerian energy prices are really low compared to other countries, approximately 14 times lower than in the USA and they are 31 times lower than French rates. In terms of the price per square metre of windows, Algerian prices appear to be the highest for simple glazing windows and double clear glazing with no fills, and the lowest for double clear glazing windows filled with Argon gas. When comparing the Algerian payback time results with the USA and France results, it can be seen that the Algerian payback time is longer than in the two other countries, with respectively 8 and 15 times more for the double clear glazing windows with no fill and 4 and 7 for the double clear glazing windows with Argon gas.

Overall, a profit can be made for all cities if energy usage is set to electricity, and no profit can be made if energy usage is switched to gas. Only Constantine can make a profit out

of the combination of the two types of energy with the two types of glazing. This study is in accordance with (Missoum *et al.*, 2016) who studied PV system application in bioclimatic houses, and confirms that the payback periods of different strategies used to achieve NZE proves them to be hardly economically profitable.

CONCLUSION

The current study's main goal was to determine the effects of glazing types and window-to-wall ratios on energy consumption in three Algerian climates: semi-arid, arid, and Mediterranean, using energy simulation tools Autodesk Revit® software and Sefaira plugin. Three types of glazing with different U-value, SHGC and visual transmittance, with a series of WWR from 10% to 90% were tested. According to the simulation, the results can be summarised as follows:

- First, after conducting several investigations with local windows manufacturers, single glazing, double clear glazing with no fill, double clear glazing filled with Argon gas windows were identified as the ones that are widely available and can be found locally for a reasonable price.
- Second, according to the comparison of the three types of glazing, double glazing

windows with Argon gas have the greatest potential for energy savings and are the most stable in terms of energy efficiency when increasing the WWR in all the studied climates.

- Third, the WWR has a significant effect on the energy consumption of residential buildings in the studied climates. The optimal WWR for a given orientation can't be selected without considering other elements of intervention, like in our case, the type of glazing.

- Fourth, the payback periods of the different types of glazing are really long when compared to other countries, and that is due to low energy prices in Algeria. Only a few studied cases could be implemented with profitability depending on the life time of these elements and their warranty.

- Fifth, shorter payback periods could be achieved if the price of the building elements is lowered or the energy price subvention is removed.

- Sixth, because of the nature of economic strategies that are heavily dependent on fossil fuel exports, the amount of energy that is saved from energy efficiency measures and renewable energies could be calculated at the government level as an equivalent of exported energy to other countries.

[Written in English by the authors]

BIBLIOGRAPHY

- ALBADRY, S., TARABIEH, K. and SEWILAM, H. (2017) 'Achieving Net Zero-Energy Buildings through Retrofitting Existing Residential Buildings Using PV Panels', *Energy Procedia*, 115(July), pp. 195-204. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.05.018>
- ALHAOLA, K., MANZOUR, A. and ELBASSUONI, R. (2019) 'Optimizing windows for enhancing daylighting performance and energy saving', *Alexandria Engineering Journal*, 58(1), pp. 283-290. <https://doi.org/10.1016/j.aej.2019.01.004>
- ALSHAIL, A. and ALMHAQDI, A. (2020) 'The Effect of Window-to-Wall Ratio (WWR) and Window Orientation (WO) on the Thermal Performance: A preliminary overview'. In: *Environment-Behaviour Proceedings Journal*, pp. 165-173. <https://doi.org/10.21834/ebpj.v5i15.2500>
- ASHRAE (2014) 'Measurement of Energy, Demand, and Water Savings', *ASHRAE Guideline 14-2014*, 4, pp. 1-150. Available at: [www.ashrae.org/technology](http://www.ashrae.org/ASHRAE%20www.ashrae.org/technology)
- ATTIA, S. (2016) 'Towards regenerative and positive impact architecture: A comparison of two net zero energy buildings', *Sustainable Cities and Society*, 26, pp. 393-406. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2016.04.017>
- CESARI, S. et al. (2018) 'Energy savings in hospital patient rooms: The role of windows size and glazing properties'. In: *Energy Procedia*. Elsevier B.V., pp. 1151-1158. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2018.08.027>
- CHI, F. et al. (2020) 'An investigation of optimal window-to-wall ratio based on changes in building orientations for traditional dwellings', *Solar Energy*, 195(September 2019), pp. 64-81. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2019.11.033>
- CHIESA, G. et al. (2019) 'Parametric optimization of window-to-wall ratio for passive buildings adopting a scripting methodology to dynamic-energy simulation', *Sustainability (Switzerland)*, 11(11). <https://doi.org/10.3390/su11113078>
- EIA (2016) *International energy outlook 2016, International Energy Outlook and Projections*. Available at: www.eia.gov/forecasts/iewo/
- HARMATI, N. and MAHYAR, Z. (2015) 'Influence of WWR, WG and glazing properties on the annual heating and cooling energy demand in buildings'. In: *Energy Procedia*. Elsevier B.V., pp. 2458-2463. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2015.11.229>
- HASSOUNEH, K., ALSHOUL, A. and AL-SALAYMEH, A. (2010) 'Influence of windows on the energy balance of apartment buildings in Amman', *Energy Conversion and Management*, 51(8), pp. 1583-1591. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2009.08.037>
- HU, M. (2019) 'Does zero energy building cost more? - An empirical comparison of the construction costs for zero energy education building in United States', *Sustainable Cities and Society*, 45, pp. 324-334. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2018.11.026>
- IEA (2021) *World Energy Outlook, Journal of Helminthology*. <https://doi.org/10.1017/S0022149X08006196>
- LEE, J.W. et al. (2013) 'Optimization of building window system in Asian regions by analyzing solar heat gain and daylighting elements', *Renewable Energy*, 50, pp. 522-531. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2012.07.029>

- MAHDAMI ADELI, M., SARHADDI, F. and FARAHAT, S. (2019) 'Parametric Study of the Impact of Windows to Wall Ratio on Reduction of Energy Consumption and Environmental Impact of a Zero-Energy Building in Different Orientations', *Journal of Computational Applied Mechanics*, 50(2), pp. 295-302. <https://doi.org/10.22059/jcamch.2019.288460.424>
- MARINO, C., NUCARA, A. and PIETRAFESA, M. (2017) 'Does window-to-wall ratio have a significant effect on the energy consumption of buildings? A parametric analysis in Italian climate conditions', *Journal of Building Engineering*, 13(July), pp. 169-183. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2017.08.001>
- Ministère de l'énergie (2020) 'Bilan Énergétique National 2019', p. 44. Available at: www.energy.gov.dz
- Ministère de l'Habitat (1997) 'Réglementation thermique des bâtiments d'habitation: règles de calcul des déperditions calorifiques DTR C 3-2', *Document Technique Réglementaire, Ministère de l'habitat, Algérie*, p. 72.
- MISDOUM, M. et al. (2016) 'Impact of a grid-connected PV system application in a bioclimatic house toward the zero energy status in the north of Algeria', *Energy and Buildings*, 128, pp. 370-383. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.07.005>
- TAHERAHMADI, J., NOOROLLAHI, Y. and PANAH, M. (2021) 'Toward comprehensive zero energy building definitions: a literature review and recommendations', *International Journal of Sustainable Energy*, 40(2), pp. 120-148. <https://doi.org/10.1080/14786451.2020.1796664>
- TARABIEH, K., MASHALY, I. and RAGHED, Y. (2017) 'A comparative study for the selection of a curtain wall glazing type suitable in a regional hot arid climate condition'. In: *Proceedings of 23rd PLEA International Conference: Design to Thrive, PLEA 2017*, pp. 5262-5269.
- TORCELLINI, P. et al. (2006) 'Zero Energy Buildings: A Critical Look at the Definition'. In: *ACEEE Summer Study Pacific Grove*, p. 15. Available at: <http://www.nrel.gov/docs/fy06osti/39833.pdf>
- TROUP, L. et al. (2019) 'Effect of window-to-wall ratio on measured energy consumption in US office buildings', *Energy and Buildings*, 203. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2019.109434>
- WESTPHAL, F.S. and ANDRÉZ, C. (2016) 'Influence of Glazed Façades on Energy Consumption for Air Conditioning of Office Buildings in Brazilian Climates', *Int. Journal of Engineering Research and Application www.ijera.com ISSN, 6(11)*, pp. 2248-962254. Available at: www.ijera.com

SOURCES OF FIGURES AND TABLES

Authors – except: Fig. 4 (small globe) Autor M. Bitton – derived from File: Algeria (orthographic projection).svg (for the map) and File: DZA orthographic.svg (for the centered projection), CC BY-SA 4.0, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=86739449>

AUTHORS' BIOGRAPHIES AND CONTRIBUTIONS

ABDELHAKIM WALID MAKHLOUF, Ph.D., with several years of experience in the field joined and tutored by Dr **SAMIRA LOUAFI** both working in the speciality of Architecture and environment in the laboratory Laboratory of Bioclimatic Architecture and Environment, having previous many publications and conferences as cited in the google scholar profile.

Conceptualization AWM and SL; methodology AWM and SL; software AWM; validation AWM and SL; writing – original draft preparation AWM; review and editing SL; visualization AWM; supervision SL; project administration AWM.

Both authors have read and agreed to the published version of the manuscript.

ABBREVIATIONS

ASHRAE	American Society of Heating, Refrigerating, and Air-Conditioning Engineers
BIM	Building Information Modelling
BL	Building Life (years)
CV (RMSE)	Coefficient of Variation (Root-Mean-Square Error)
EUI	Energy Use Intensity
HVAC	Heating, Ventilation, and Air Conditioning
MBE	Mean Bias Error
PBP	Payback Period (years)
P	Profitability
TOE	Tonne Oil Equivalent
WWR	Window to Wall Ratio
NZEB	Net Zero Energy Buildings
NZE	Net Zero Energy
EPBD	Energy Performance of Buildings Directive
DTR	Regulatory Thermic Document
U-value	Thermal transmittance (W m ⁻² K ⁻¹)
Tvis	Visible Transmittance
SHGC	Solar Heat Gain Coefficient
MENA	Middle East and North Africa
CBCECS	Commercial Buildings Energy Consumption Survey



Nom et Prénom : Abdelhakim Walid MAKHLOUFI

Titre : L'utilisation de la méthode 'Cost-optimality' dans la conception d'un bâtiment collectif à net zéro énergie sous des scénarios futurs de changement climatique en Algérie.

Thèse en vue de l'Obtention du Diplôme de Doctorat LMD en Architecture, en Architecture et environnement.

Résumé

Dans le contexte de l'accélération du changement climatique et des impératifs inhérents à la pratique architecturale durable, il convient de souligner que le secteur résidentiel demeure l'un des principaux postes de consommation énergétique, avec les conceptions standardisées qui prédominent, souvent au détriment des mesures d'efficacité énergétique et en négligeant les particularités climatiques locales. Cette tendance conduit ainsi à une représentation dépassant un tiers de la consommation énergétique totale à l'échelle mondiale et nationale. Par conséquent, il devient impératif d'adopter une approche stratégique et proactive en vue de favoriser des pratiques de construction plus durables et écoénergétiques.

Cette étude s'engage à élaborer une méthodologie fondée sur l'approche de la "Cost-Optimality" en vue d'atteindre la Net Zéro Énergie dans les bâtiments collectifs algériens. Cette démarche intègre diverses stratégies, tant passives qu'actives, ainsi que l'utilisation d'énergies renouvelables. Cette intégration est facilitée par une approche quantitative, exploitant une revue exhaustive de la littérature sur l'énergie Net Zéro, un questionnaire évaluant le niveau de connaissance des professionnels du domaine, des mesures sur site de l'étude de cas, et l'utilisation de modèles et de simulations numériques.

L'étude est conduite dans trois zones climatiques distinctes, à savoir le climat semi-aride de Constantine, le climat méditerranéen d'Alger et le climat aride de Ghardaïa. De plus, elle tient compte de trois scénarios futurs de changement climatique (RCP 2.6, 4.5, 8.5).

Les résultats finaux mettent en évidence le rôle central joué par les bâtiments Net Zéro Énergie dans l'atténuation de l'impact du secteur du bâtiment sur les défis liés à la transition énergétique et au changement climatique. Ainsi, l'application de la méthodologie de la "Cost-Optimality" pour parvenir à la Net Zéro Énergie dans les bâtiments résidentiels collectifs se révèle être une approche pragmatique et viable vers un environnement plus écologique et résilient.

Grâce à l'adoption de stratégies diversifiées, il devient possible de créer un environnement bâti qui non seulement réduit la consommation énergétique, mais atténue également les émissions de gaz à effet de serre. Malgré des investissements initialement plus élevés, la viabilité incontestable de ces bâtiments Net Zéro Énergie est affirmée, en particulier lors de la considération des divers scénarios de concentration représentatifs. Cela souligne l'importance cruciale d'accorder la priorité à la Net Zéro Énergie en tant qu'élément central des initiatives de lutte contre le changement climatique.

Mots clés : Net zéro énergie, Efficacité énergétique, Cost-optimality, Bâtiments résidentiels durable, Changement climatique.

Directeur de thèse : Samira LOUAFI - Université constantine3.

Année universitaire :2023-2024