



République Algérienne démocratique et populaire
Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche
scientifique
Université Mostepha Ben Boulaid- Batna 2
Institut d'Hygiène et Sécurité
Laboratoire de Recherche en Prévention Industrielle (LRPI)



THÈSE

Présentée en vue de l'obtention du diplôme de

DOCTEUR EN SCIENCES

En

Hygiène & Sécurité Industrielle

Option : Gestion des Risques

Par

Mr. Sofiane RAHMOUNI

Magister en Hygiène et Sécurité Industrielle

Thème

Evaluation et Amélioration Energétiques de Bâtiments dans le cadre du Programme National d'Efficacité Energétique

Soutenue publiquement le 29 /01/2020 devant le Jury composé de :

Pr. Nouredine BOURMADA
Dr. Rachid SMAIL
Pr. Hocine ALI-KHOUDJA
Pr. Chemseddine DERFOUF
Dr. Lylia BOUBAKER

Professeur Université de Batna 2
Maître de conférences Université de Batna 2
Professeur Université de Constantine1
Professeur Université de Biskra
Maître de conférences Université de Batna 2

Président
Rapporteur
Examineur
Examineur
Invité

Année Universitaire : 2019-2020

Résumé

Le secteur des bâtiments et de la construction est un acteur clé dans la lutte contre le changement climatique. La consommation d'énergie des bâtiments a augmenté rapidement ces dernières années. Pour réduire cela, l'Algérie a élaboré un programme national d'efficacité énergétique.

Dans le cadre de cette thèse, la mise en place de mesures d'efficacité énergétique appropriées peuvent réduire cette consommation d'énergie et protéger l'environnement, sans influencer le confort des occupants.

Dans notre cas, nous avons évalué l'impact des mesures proposées sur la consommation énergétique d'un bureau standard construit, selon la réglementation algérienne. L'étude est menée sur trois villes algériennes qui représentent trois zones climatiques différentes.

Mots clés:

Approche - Mesures d'efficacité énergétique - Bureau - Climats - Consommation finale d'énergie - Réduction des coûts d'énergie - Émissions de CO₂.

Abstract

The building and construction sector is a key actor in the fight against climate change. Energy consumption for these buildings grows speedily last years. To reduce that, Algeria developed an agenda that deals with energy efficiency.

As part of this thesis, the implementation of appropriate energy efficiency measures can reduce this energy consumption and protect the environment, without influencing the occupants' comfort.

In our case, we evaluated the impact of the proposed measures on the energy consumption of a typical office building, according to Algerian regulations. The study is conducted in three Algerian cities representing three climatic zones

Keywords:

Approach - Energy efficiency measures - Office building - Climates - Final energy consumption - Cost saving - CO₂ emission.

الأخيرة.	ينمو	لهذه	استهلاك	تغير	والتشييد له دور رئيسي
					هذه
	و حماية البيئة،	يقلل	استهلاك	يمكن لتطبيق التدابير	شاغليها.
	للمعايير الجزائرية.		استهلاك	بتقييم تأثير التدابير	أجريت
			مناخية.	جزائرية	الكلمات الدالة:
أكسيد	- توفير التكاليف -	- الاستهلاك النهائي	-	-	المنهج - تدابير

Dédicace

Ce travail est dédié

A mes parents ;

A ma grande famille ;

A ma petite famille ;

A mon fils Moncef Fadi ;

A mes amis et à tous ceux qui ont cru en moi et m'ont soutenue ;

Mon infinie gratitude et ma reconnaissance.

Remerciements

Avec l'aide de Dieu tout puissant, j'ai pu accomplir ce modeste travail

Ce travail du mémoire n'a pu voir le jour sans l'appui et le soutien de nombreuses personnes que je souhaite ici vivement remercier :

Monsieur ***SMAIL Rachid***, maître de conférences à l'université Batna2, mon encadreur, pour avoir guidé mon travail et ma réflexion avec intérêt, rigueur et disponibilité,

Monsieur ***BOURMADA Noureddine***, professeur à l'université du Batna2, pour l'honneur qu'il me fait en acceptant la présidence du jury.

Monsieur ***ALI-KHOUDJA Hocine***, professeur à l'université du Constantine1 et monsieur ***DERFOUF Chemseddine***, professeur à l'université du Biskra pour le temps qu'ils ont consacré à l'évaluation de mon travail.

Je remercie vivement mes enseignants et collègues de l'institut hygiène et sécurité, en particulier monsieur ***SIMOHAMED Antar*** pour leur précieux soutien et courage pour accomplir ce modeste travail et monsieur ***CHBILA Mourad*** pour ces conseils.

Enfin, ces remerciements ne sauraient être complets si n'y incluais ma famille pour leurs amour, l'aide morale et la motivation qu'ils m'ont apporté pour achever ce travail et mes proches pour leur soutien, leur confiance et leur encouragement tout au long de ces années de mémoire. Un énorme merci à vous tous.

Table des matières

Résumé.....	I
Dédicace.....	II
Remerciements.....	III
Table des matières.....	IV
Liste des figures.....	VIII
Liste des tableaux.....	X
Abréviations, acronymes.....	XI
Introduction générale.....	1

Chapitre 1 Etat de l'art sur l'efficacité énergétique

Introduction.....	6
1. Les principes du développement durable appliqués au bâtiment.....	6
1.1. Performances environnementales.....	7
1.2. Performances économiques.....	7
1.3. Performances sociales.....	8
2. Les bénéfices de la Construction durable.....	8
3. Efficacité énergétique.....	8
3.1. Définition.....	8
3.2. Avantages de l'efficacité énergétique.....	9
3.3. Certification énergétique des bâtiments.....	9
3.3.1. Passiv-Haus.....	10
3.3.2. BBC-Effinergie.....	10
3.3.3. MINERGIE.....	10
3.3.4. LEED.....	11
3.3.5. BREEAM.....	11
3.3.6. Label HQE.....	12
3.3.7. BCA Green Mark.....	12
3.4. Les normes de performance énergétique.....	13
3.5. Types bâtiments à efficacité énergétique.....	14
3.5.1. L'écoconstruction.....	14
3.5.2. L'architecture bioclimatique.....	14
3.5.3. Les maisons Basse consommation.....	14
3.5.4. Les maisons passives.....	15
3.5.5. Les maisons à énergie positive.....	15
3.5.6. Les maisons autonomes ou maisons zéro-énergie.....	15
4. Solutions d'amélioration énergétique.....	16
4.1. Les solutions passives.....	16
4.1.1. La compacité.....	16
4.1.2. Organisation des espaces de vie.....	17
4.1.3. L'éclairage naturel des bâtiments.....	18
4.1.4. Proportion de surface vitrée.....	19
4.1.5. Vitrage.....	20

4.1.5.1. Propriétés des vitrages.....	21
4.1.5.2. Types de fenêtres et de lucarnes.....	22
4.1.5.3. Vitrage à haute performance.....	23
4.1.6. Protections solaires.....	24
4.1.7. Enveloppe du bâtiment.....	26
4.1.7.1. Les ponts thermiques.....	27
4.1.7.2. L'inertie thermique.....	27
4.1.7.3. Isolation thermique.....	27
4.1.7.4. Les différents types d'isolation.....	28
4.1.7.5. Les différents matériaux isolants, 4 grandes familles.....	29
4.1.7.6. Les façades ventilées.....	29
4.1.8. La ventilation des bâtiments.....	30
4.2. Les solutions actives.....	30
4.2.1. Capteurs, contrôles et réseaux.....	30
4.2.1.1. Les attentes des systèmes de contrôle.....	31
4.2.2. La conception durable des systèmes CVC.....	31
4.2.3. Famille des systèmes CVC.....	32
4.2.3.1. Systèmes décentralisés.....	32
4.2.3.2. Systèmes centralisés.....	33
4.2.3.3. Systèmes de distribution de l'air.....	33
4.2.4. Les énergies renouvelables.....	34
4.2.5. Les pompes à chaleur (PAC).....	35
4.3. Comportement des occupants.....	35
Conclusion.....	36
<i>Chapitre 2 : La thermique du bâtiment et la simulation énergétique</i>	
Introduction.....	38
1. Conception architecturale et l'intégration des enjeux énergétique.....	38
2. Echange thermiques de bâtiment avec son environnement.....	39
2.1. Le transfert de chaleur.....	39
2.2. Les apports d'énergie dans le bâtiment.....	40
2.3. Perte de chaleur et gain de chaleur.....	41
2.4. Calculs de perte de chaleur dans les bâtiments.....	41
2.5. Le confort thermique.....	43
3. La simulation énergétique des bâtiments.....	43
3.1. Modélisation et/ou simulation.....	43
3.2. Le concept de simulation énergétique.....	43
3.3. Les atouts de la simulation énergétique.....	44
3.4. Le processus de simulation énergétique.....	45
3.5. Les sous-systèmes de la simulation énergétique.....	46
3.5.1. Processus météorologiques.....	47
3.5.2. Processus bâtiment (type de bâtiment.....	47
3.5.3. Processus système climatisation, ventilation et chauffage.....	48
3.5.4. Processus occupation.....	48

3.5.5. Processus éclairage.....	49
3.5.6. Processus équipements électriques.....	49
3.6. Les outils de simulation.....	49
3.6.1. DOE2.....	50
3.6.3. EQUEST.....	50
3.6.5. Energy Plus.....	51
3.6.6. Design Builder.....	51
3.6.7. Open Studio.....	51
3.6.8. SIMEB.....	52
3.6.9. TRNSYS39.....	52
3.6.10. HAP.....	52
Conclusion.....	53

Chapitre 3 : La consommation énergétique en Algérie, contexte et enjeux

Introduction.....	55
1. Situation énergétique dans le monde.....	55
1.1 Bilan mondial.....	55
1.2 Investissement mondiale et financement pour les bâtiments durables.....	57
1.3 Politique durable en construction des bâtiments.....	58
1.4 Codes énergétiques du bâtiment.....	58
2. Consommation énergétique en Algérie.....	60
2.1. La consommation énergétique par type d'énergie.....	60
2.2. La consommation énergétique par secteur.....	61
3. La politique énergétique en Algérie	62
3.1. Les textes règlementaires.....	62
3.2. Documents techniques règlementaire.....	63
3.3. Les dispositifs institutionnels de l'efficacité énergétique en Algérie.....	64
4. Programme national d'efficacité énergétique à l'horizon 2030.....	66
4.1. Secteurs d'intervention de programme.....	66
4.1.1. Pour le secteur du bâtiment.....	66
4.1.2. Pour le secteur des transports.....	67
4.1.3. Pour le secteur de l'industrie.....	67
4.2. Les axes d'interventions de programme.....	67
5. Les programmes nationaux pour la maîtrise d'énergie.....	69
6. Les coopérations internationales.....	70
6.1. Projet CES-MED.....	70
7. Les techniques de construction en Algérie.....	71
7.1. Les matériaux de construction.....	72
7.2. Les problèmes énergétiques liés à la production des bâtiments.....	72
Conclusion.....	74

Chapitre 4 : Présentation de la démarche et le cas d'étude

Partie 1 : Présentation de cas d'étude

Introduction.....	77
--------------------------	-----------

1. Démarche de conception et amélioration d'efficacité énergétique des bâtiments tertiaire.....	77
2. Description de cas d'étude.....	79
2.1. Pourquoi les bâtiments tertiaire ?.....	79
2.2. Caractéristiques du bureau standard.....	79
2.3. Ventilation et système de chauffage/rafraîchissement.....	82
2.4. Scénario d'occupation.....	82
2.5. Météorologie.....	84
3. Mesures d'efficacité énergétique proposée.....	84
4. Évaluation des mesures d'efficacité.....	88
5. Détermination des mesures d'efficacité optimale.....	88
6. Évaluation des mesures optimales.....	88
7. Présentation des outils de simulation.....	89
7.1. Hourly Analysis Program (HAP v 4.9).....	89
7.1.1. C'est quoi le HAP.....	89
7.1.2. Composition de HAP.....	89
7.1.3. Caractéristiques de conception du système HAP.....	89
7.1.4. Fonctionnalités d'analyse d'énergie HAP.....	89
7.1.5. Approches de saisie des alternatives par HAP.....	90
7.1.6. Analyse énergétique par HAP.....	91
7.2. Méteonorme7.....	95

Partie 2 : Résultats et discussion

Introduction.....	97
1. Evaluation énergétique de bureau standard.....	97
1.1 Détermination des puissances de chauffage et de climatisation.....	97
1.2 Répartition de la consommation annuelle d'énergie.....	98
1.3 La consommation mensuelle de chauffage et de climatisation.....	99
1.4 Coûts d'énergie annuels.....	100
1.5 Emission de gaz CO ₂	100
2. Evaluation des mesures d'efficacités énergétiques proposées.....	101
2.1 Impact de l'orientation.....	101
2.2 Impacts de l'isolation thermique de l'enveloppe.....	101
2.3 Impacts des vitrages et des protections solaires.....	103
2.4 Impact du confort thermique et du système CVC.....	105
3. Détermination des mesures optimales.....	107
4. Évaluation des mesures optimales.....	108
Conclusion.....	111
 Conclusion générale.....	 112
Reference bibliographies.....	115
Annexes.....	120

Liste des figures

Figure 1.1 Cycle de vie d'un bâtiment.....	7
Figure 1.2 Variation de forme selon la géométrie de bâtiment.....	17
Figure 1.3 Organisation des espaces de vies selon l'orientation de soleil.....	18
Figure 1.4 Les différents modèles de fenêtre.....	23
Figure 1.5 Principe de double vitrage avec couche à basse émissivité.....	24
Figure 1.6 Protection solaire extérieur fixe.....	25
Figure 1.7 Protection solaire extérieur mobile	25
Figure 1.8 Les sources de déperdition de chaleur de l'enveloppe d'un bâtiment.....	26
Figure 1.9 Isolation par intérieur et par extérieur.....	28
Figure 1.10 Composition d'une façade double-peau (façade ventilée)	29
Figure 1.11 Intégration des énergies renouvelables des bâtiments Green Office® Meudon Architecte	35
Figure 2.1 Echanges thermiques au sein d'un bâtiment et avec son environnement	40
Figure 2.2 Les chemins de transfert de chaleur.....	42
Figure 2.3 Illustration des données d'entrée pour les outils de simulation.....	46
Figure 2.4 Interactions dynamiques de sous-systèmes (changeant continuellement) dans des bâtiments.....	46
Figure 3.1 Part de la consommation d'énergie finale et d'émissions mondiales des bâtiments et de la construction, 2017.....	56
Figure 3.2 Consommation d'énergie finale par source d'énergie du secteur mondial des bâtiments, 2010-17.....	57
Figure 3.3 Investissement mondial dans l'efficacité énergétique des bâtiments, 2017.....	58
Figure 3.4 Code énergétique du bâtiment par juridiction, 2017-2018	59
Figure 4.1 Approche de conception et amélioration d'efficacité énergétique des bâtiments tertiaire.....	78
Figure 4.2 Les dimensions de bureau standard (S.B)	80
Figure 4.3 Le système de construction en Algérie.....	81
Figure 4.4 Les scénarios d'occupation pour les personnes, équipements, chauffage et climatisation, et éclairage.....	83
Figure 4.5 Présentation géographique des villes d'étude.....	84
Figure 4.6 Température moyenne mensuel des villes.....	85
Figure 4.7 Procédure d'analyse énergétique utilisée par HAP.....	91
Figure 4.8 Image des fichiers de météo créée par logiciel météonorm pour trois villes.....	96

Figure 4.9 Puissance des systèmes de climatisation et chauffage.....	97
Figure 4.10 Répartition par usage de la consommation énergétique annuelle dans les trois villes.....	98
Figure 4.11 La consommation mensuelle en énergie de climatisation et chauffage, a) Batna b) Alger c) Ouargla.....	99
Figure 4.12 Coûts d'énergie annuels pour chaque site	100
Figure 4.13 Emission de gaz à effet de serre CO ₂ de chaque site.....	100
Figure 4.14 Effet de l'orientation du bâtiment sur l'intensité énergétique de la climatisation et du chauffage.....	101
Figure 4.15 Impact de l'isolation thermique de l'enveloppe sur l'intensité énergétique de la climatisation et du chauffage (a) Isolation du toit, (b) Isolation des murs, (c) La réflectance solaire de toit.....	103
Figure 4.16 Impact de vitrage et l'ombrage interne sur l'intensité énergétique de la climatisation et du chauffage.....	104
Figure 4.17 Impact de la nuance externe (over Hang) de sur l'intensité énergétique de la climatisation et du chauffage.....	105
Figure 4.18 Effets du confort thermique des systèmes CVC sur l'intensité de l'énergie de climatisation et de chauffage. (a) points de consigne de climatisation, (b) points de consigne de chauffage, (c) efficacité des systèmes.....	106
Figure 4.19 Économie de consommation d'énergie finale du bureau standard avec la combinaison de mesures d'efficacité optimales.....	108
Figure 4.20 Économies de cout d'énergies totales en DA d'un bureau standard et la combinaison de mesures d'efficacité optimales.....	109
Figure 4.21 Emission CO ₂ d'un bureau standard et la combinaison de mesures d'efficacité optimales.....	109
 Figure A.1 Electric Use Profiles - Monday, January 1 (day 1) thru Monday, December 31 (day 365) on Batna.....	 120
Figure A.2 Electric Use Profiles - Monday, January 1 (day 1) thru Monday, December 31 (day 365) on Algeria.....	121
Figure A.3 Electric Use Profiles - Monday, January 1 (day 1) thru Monday, December 31 (day 365) on Ouargla.....	122

Liste des tableaux

Tableau 3.1 : La consommation finale par produit.....	60
Tableau 3.2 : La consommation finale par secteur.....	62
Tableau 4.1 : Caractéristiques des matériaux utilisés.....	80
Tableau 4.2 : Les caractéristiques et la composition de l’enveloppe.....	81
Tableau 4.3 : Caractéristiques de fenêtre de base.....	82
Tableau 4.4 : Caractéristiques des villes correspondent à cette étude.....	84
Tableau 4.5 : Caractéristiques climatique des villes correspondent à cette étude.....	84
Tableau 4.6 : Les mesures d’efficacités énergétiques proposées.....	87
Tableau 4.7 : Économies d’énergie de chauffage et de refroidissement des mesures d’efficacité dans trois zones climatiques.....	107
Tableau 4.8 : Les mesures d’efficacité optimale.....	108
Tableau A.1 : Coefficients de référence.....	120
Tableau A.2 : les valeurs de la température extérieure de base –hiver.....	120
Tableau A.3 : les valeurs de la température extérieure de base – été	120

Abréviations, acronymes

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

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

B.S : Bureau Standard.

C.V.C : Climatisation, ventilation et chauffage.

CDD: Cooling Degree Day.

CF : Coefficient de Forme.

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

CO₂ : Dioxyde de carbone.

DTR : Documents Techniques Réglementaires.

GES : Gaz à Effet de Serre.

GNc : Gaz Naturel Carburant.

GPL : gaz de pétrole liquéfié.

GPL/c : Gaz de Pétrole Liquéfié Carburant.

HAP: Hourly Analysis Program.

HDD: Heating Degree Day.

K_e : Indice de fraîcheur.

KWh : Kilo Watt Heure.

M.E.E : Mesures Efficacité Energétique.

PAC : Pompe A Chaleur.

QEB : Qualité Environnementale d'un Bâtiment.

SCOP: Seasonal Coefficient of Performance.

SEER: Seasonal Energy Efficiency Ratio.

SHGC: Solar Heat Gain Coefficient.

Tep: Tonne Equivalent Pétrole.

Teq-co₂: Tonnes équivalent CO₂.

WWR: Window Wall to Rate.

Introduction générale

Le changement climatique s'est présenté comme un défi de taille pour la société au XXI^e siècle. La hausse des températures est une menace potentielle pour les écosystèmes, mais aussi pour les humains. Ils affectent directement le comportement thermique des bâtiments, en augmentant la consommation d'énergie¹ pour maintenir le confort thermique de ses utilisateurs. En conséquence, les émissions de gaz à effet de serre découlant de l'utilisation d'énergie par les bâtiments représentent environ 39 % des émissions mondiales en 2017. Cette situation inquiétante a obligé les pays du monde entier à mettre en place des projets et politiques publiques renforçant l'efficacité énergétique des bâtiments (Global ABC, 2018).

L'Algérie ne fait pas l'exception des pays en voie de développement, dont la croissance continue de la population et de la construction est le principal facteur de la demande accrue en énergie dans le secteur des bâtiments. Des modèles de construction étrangers se sont généralisés sur tout le territoire algérien, inappropriée au contexte culturel, social et climatique du pays. En conséquence, le secteur bâtiments a été classé le plus énergivore avec une consommation qui représente environ de 44 % de la consommation finale (MEA², 2017).

Pour cela, l'Algérie met en œuvre un programme national d'efficacité énergétique (PNEE) à l'horizon 2030 (APRUE³, 2015a). Ce programme vise globalement la réduction de la consommation de 9 % à travers la substitution inter énergétique et l'introduction des équipements et des technologies performantes dans l'ensemble des secteurs ; le bâtiment, le transport et l'industrie.

L'efficacité énergétique est maintenant reconnue comme l'une des approches les plus rapides et les plus appropriées pour réduire les émissions des gaz à effet de serre liées à la consommation d'énergie et rendre la conception des bâtiments développés et durable. Cette approche exige de présenter l'ensemble des techniques, méthodes ainsi que les solutions et les pistes de réflexion qui s'intéressent à l'amélioration des performances énergétique des bâtiments. La focalisation se fera sur les solutions les plus adaptées au climat local et aux éléments qui compose les bâtiments (Loonen et al., 2016; Navid et al., 2018; Fatemeh et al., 2017; Nima, 2017; Koezjakov, 2018; Kneifel et O'Rear, 2016).




¹ Les progrès les plus notables sont en matière de chauffage, climatisation, d'éclairage et de cuisine domestique.

² Ministère d'énergie algérienne.

³ Agence Nationale pour la Promotion et la Rationalisation de l'Utilisation de l'Energie.

Le présent travail a pour objectif l'étude de l'impact des mesures d'efficacité énergétique sur les besoins énergétiques thermiques d'un bâtiment tertiaire conditionné par des données météorologique de trois villes algériennes ; Alger, Batna et Ouargla qui représente respectivement trois zones climatiques ; zone méditerranéenne, zone semi-aride et zone désertique, afin d'améliorer leur performance énergétique et réduire leurs émissions de gaz à effet de serre, en adaptant les mesures les plus appropriées pour chaque zone. Cela, permettra aux autorités algériennes de réaliser des bâtiments durables, adaptés au programme et à la stratégie nationale.

Ceci nous ramène à poser les questions fondamentales de recherche suivante :

-  Quelle est la mesure d'efficacité énergétique le plus performant (Isolation thermique, propriétés de vitrage, les systèmes CVC⁴ 'climatisation ventilation et chauffage'),.....Ets?
-  Quelles sont les caractéristiques optimales de la combinaison de ces mesures d'efficacité énergétique les plus appropriés pour chaque zone climatique ?
-  Quelle démarche à suivre et quel outil adapté pour valider les résultats ?

Afin de répondre à ces questions et atteindre les résultats escomptés dans ce travail, une démarche méthodologique est proposée, axée sur les méthodes numériques par la simulation énergétique des bâtiments à l'aide du logiciel de simulation HAP⁵ (Hourly Analysis Program). La simulation se fera sur un bureau standard modélisé et qui servira de cas de base et de référence, pour déterminer l'impact des mesures d'efficacité énergétique sélectionnés indépendamment et ressortir à chaque fois les paramètres des cas optimaux qui seront regroupés pour former le cas optimal de chaque zone climatique d'une part. Et d'autre parts, pour fournir aux parties prenantes les informations nécessaires à travers des indicateurs de performance, afin qu'ils puissent prendre des décisions adéquates pour chaque situation étudiée dans le cadre de programme national d'efficacité énergétique (PNEE).

Suite à la méthodologie exposée, le présent manuscrit se composera en deux : théorique et pratique. La phase théorique sera présentée par deux chapitres. En outre, la phase pratique, présente le cas d'étude, la méthodologie de recherche et une présentation des résultats obtenus avec discussion.

Le chapitre 1 présente deux axes, le premier concerne un état de l'art sur l'efficacité énergétique, les différents labels et certification énergétique existant dans le monde. Le

⁴ Abréviation standard français des équipements de confort thermique.

⁵ Logiciel de simulation énergétique American.

deuxième concerne une revue sur les techniques et solutions d'écoconception existant pour l'amélioration de comportement énergétique des bâtiments.

Le chapitre 2 traite le comportement physique de bâtiment plus précisément les modes de transfert de chaleur qui contribue à la modélisation et la simulation énergétique des bâtiments. Nous présentons encore une revue sur les outils de simulation et leurs rôles dans l'amélioration des performances énergétiques par la conception des alternatives plus adapté au projet étudiant.

Le chapitre 3 consacre l'élaboration d'un bilan sur la politique énergétique au monde et particulièrement en Algérie. Nous présentons dans le premier axe la consommation énergétique mondiale puis nationale en tenant leur évolution. Dans le deuxième axe, nous présentons la réglementation, les stratégies telles que PNEE avec les projets d'économie et de maîtrise d'énergie met en œuvre par l'état Algérien.

Le chapitre 4 arbore deux parties ; la première présente la démarche de recherche adopté et le cas d'étude. Une description détaillée sur les caractéristiques d'enveloppe de bureau standard, les spécificités des climats des villes étudiées et les différentes mesures d'efficacité énergétique pris en compte. Comme il s'agit aussi de présenter l'outil de simulation énergétique HAP. La deuxième présente une synthèse des résultats obtenus par la simulation en trois phases ; la première phase comporte les résultats du comportement énergétique de bureau standard dans les trois villes , la deuxième étudie les résultats d'impacts des mesures d'efficacité proposées selon deux indicateurs et la dernière phase consiste à combiner les résultats de la deuxième pour obtenir des résultats optimaux pour chaque ville en terme de trois indicateurs de performance (consommation final, économie de coûts d'énergie et émission CO₂)

Finalement, une conclusion générale synthétise les résultats de cette recherche, les limites rencontrées et un aperçu sur les perspectives émergent pour la poursuite de ce travail.

Chapitre 1

Etat de l'art sur l'efficacité énergétique

Introduction.....	6
1. Les principes du développement durable appliqués au bâtiment.....	6
1.1. Performances environnementales.....	7
1.2. Performances économiques.....	7
1.3. Performances sociales.....	8
2. Les bénéfices de la Construction durable.....	8
3. Efficacité énergétique.....	8
3.1. Définition.....	8
3.2. Avantages de l'efficacité énergétique.....	9
3.3. Certification énergétique des bâtiments.....	9
3.3.1. Passiv-Haus.....	10
3.3.2. BBC-Effinergie.....	10
3.3.3. MINERGIE.....	10
3.3.4. LEED.....	11
3.3.5. BREEAM.....	11
3.3.6. Label HQE.....	12
3.3.7. BCA Green Mark.....	12
3.4. Les normes de performance énergétique.....	13
3.5. Types bâtiments à efficacité énergétique.....	14
3.5.1. L'écoconstruction.....	14
3.5.2. L'architecture bioclimatique.....	14
3.5.3. Les maisons Basse consommation.....	14
3.5.4. Les maisons passives.....	15
3.5.5. Les maisons à énergie positive.....	15
3.5.6. Les maisons autonomes ou maisons zéro-énergie.....	15
4. Solutions d'amélioration énergétique.....	16
4.1. Les solutions passives.....	16
4.1.1. La compacité.....	16
4.1.2. Organisation des espaces de vie.....	17
4.1.3. L'éclairage naturel des bâtiments.....	18
4.1.4. Proportion de surface vitrée.....	19
4.1.5. Vitrage.....	20
4.1.5.1. Propriétés des vitrages.....	21
4.1.5.2. Types de fenêtres et de lucarnes.....	22
4.1.5.3. Vitrage à haute performance.....	23

4.1.6. Protections solaires.....	24
4.1.7. Enveloppe du bâtiment.....	26
4.1.7.1. Les ponts thermiques.....	27
4.1.7.2. L'inertie thermique.....	27
4.1.7.3. Isolation thermique.....	27
4.1.7.4. Les différents types d'isolation.....	28
4.1.7.5. Les différents matériaux isolants, 4 grandes familles.....	29
4.1.7.6. Les façades ventilées.....	29
4.1.8. La ventilation des bâtiments.....	30
4.2. Les solutions actives.....	30
4.2.1. Capteurs, contrôles et réseaux.....	30
4.2.1.1. Les attentes des systèmes de contrôle.....	31
4.2.2. La conception durable des systèmes CVC.....	31
4.2.3. Famille des systèmes CVC.....	32
4.2.3.1. Systèmes décentralisés.....	32
4.2.3.2. Systèmes centralisés.....	33
4.2.3.3. Systèmes de distribution de l'air.....	33
4.2.4. Les énergies renouvelables.....	34
4.2.5. Les pompes à chaleur (PAC).....	35
4.3. Comportement des occupants.....	35
Conclusion.....	36

Introduction

Dans le cadre énergétique actuel, associé à l'épuisement de ressources fossiles et au réchauffement climatique, des nouvelles performances sont exigées pour les bâtiments. Il s'agit des performances énergétique et environnementale. La performance énergétique est liée à la consommation énergétique d'un bâtiment pour assurer la salubrité et le confort de ses occupants. Cette consommation concerne les postes de chauffage, de ventilation, de production d'eau chaude sanitaire, de ventilation, d'éclairage, des équipements électriques (réfrigérateur, ordinateur...), mais également de climatisation, dont les besoins risquent d'augmenter avec le réchauffement climatique à long terme.

La conception des bâtiments et la sélection des équipements dépendent du climat dans lequel le bâtiment fonctionne.

Pour contribuer à la performance énergétique des bâtiments, tout le monde s'accorde qu'il existe principalement trois leviers qui peuvent être activés : les solutions passives (enveloppe, orientations....), les solutions actives et le comportement des occupants.

L'objectif de ce chapitre est de mettre à la disposition des pouvoirs publics et des particuliers un état de l'art des solutions techniques disponibles dans la littérature, pour atteindre un niveau conceptuel élevé de bâtiments plus performant énergétiquement.

1. Les principes du développement durable appliqués au bâtiment

La Qualité Environnementale d'un Bâtiment (QEB) correspond aux caractéristiques, produits et services lui permettant de créer un environnement intérieur confortable et sain tout en satisfaisant les besoins de maîtrise des impacts sur l'environnement extérieur. Tout comme une Analyse de Cycle de Vie d'un produit (figure 1.1), il est important de prendre en compte tout au long du projet de construction l'ensemble du cycle de vie du bâtiment :

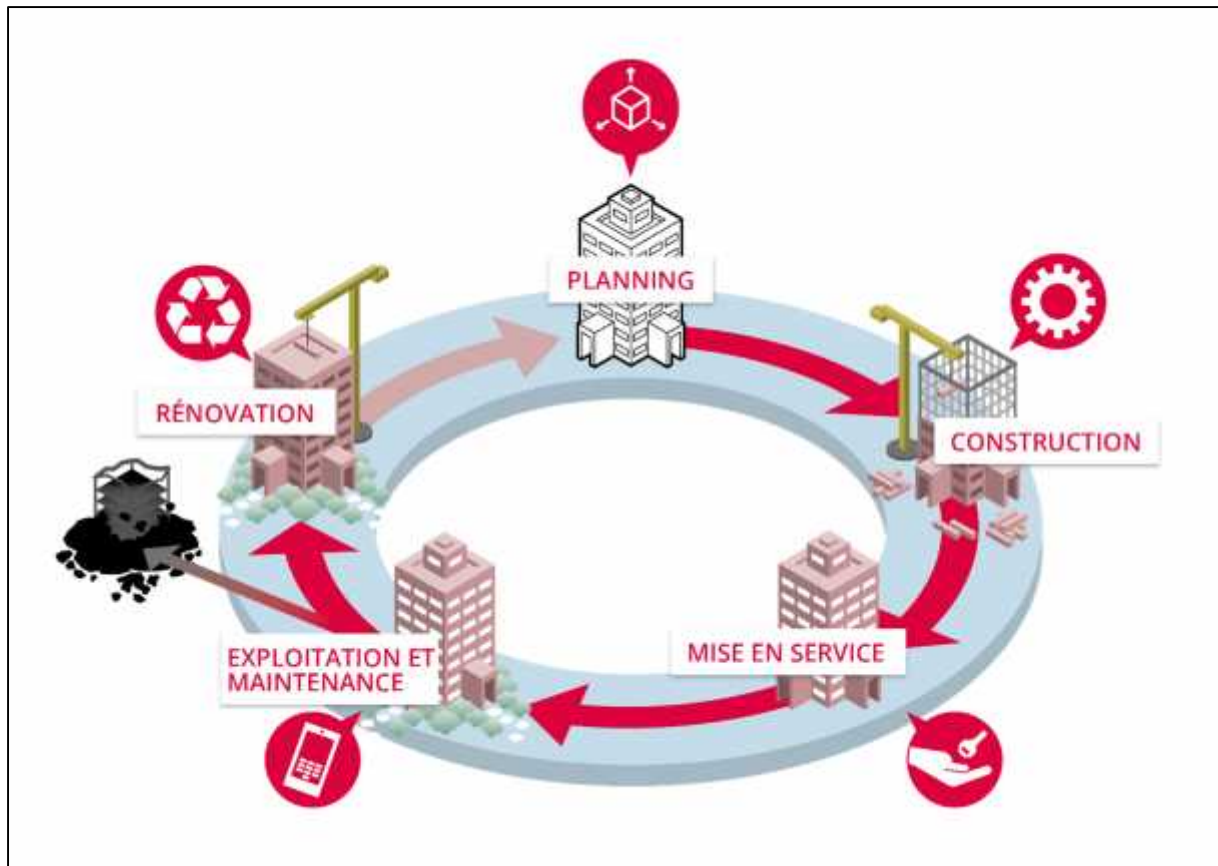


Figure 1.1 Cycle de vie d'un bâtiment.

Source : <https://hydronic-flow-control.com/fr/page/nos-services--cycle-de-vie-du-bâtiment>

L'objectif de développement durable dans le secteur bâtiments est de transformer un consommateur d'énergie en producteur d'énergie et de répondre ainsi à la production de richesse et cela selon les trois piliers de développement durable :

1.1. Performances environnementales

Limiter les impacts sur l'ensemble du cycle de vie

- ✓ Economiser les ressources dont l'énergie
- ✓ Réduire les émissions de gaz à effet de serre
- ✓ Générer moins de déchets
- ✓ Limiter les pollutions de l'eau, de l'air et des sols
- ✓ Maintenir la biodiversité
- ✓ Limiter les nuisances...

1.2. Performances économiques

Concevoir selon une approche économique globale

Raisonner en coût global sur l'ensemble du cycle de vie des bâtiments

1.3. Performances sociales

Favoriser le progrès Social

- ✓ Assurer la qualité d'air intérieur et celle de l'eau
- ✓ Assurer le confort thermique, visuel, olfactif et acoustique
- ✓ Optimiser l'accessibilité et l'adaptabilité des logements
- ✓ Augmenter la sécurité et prévenir les risques
- ✓ Réduire les nuisances sur le voisinage
- ✓ Assurer la traçabilité des matériaux
- ✓ Impliquer les utilisateurs dans les processus de décision...

2. Les bénéfices de la Construction durable

Les bénéfices de la construction durable se déclinent sur deux plans (E-rse, 2018) : celui de l'environnement et celui de la qualité de vie des occupants.

Au plan environnemental, on notera particulièrement :

-) La priorité donnée aux matériaux locaux, renouvelables, bio-sources et recyclables.
-) Une conception axée sur l'utilisation des énergies renouvelables (géothermie, aérotherme, solaire, bois...) et la préservation des ressources (gestion de l'eau)
-) Une optimisation de l'adaptation au contexte (climat, exposition...) et des dispositifs d'isolation

Pour les occupants, les avantages principaux sont :

-) Un environnement sain (qualité de l'air intérieur), dénué de tout polluant lié aux matériaux
-) Un confort de vie amélioré (isolation acoustique et thermique, gestion optimisée des sources d'énergie et de la luminosité...)
-) Des coûts d'énergie réduits après amortissement des investissements

3. Efficacité énergétique

3.1. Définition

Il existe plusieurs définitions de l'efficacité énergétique, ce qui peut parfois rendre difficile la compréhension du terme et donc son application. Afin d'éclaircir ce concept et d'en faire une ligne directrice de développement, il importe de le comprendre.

Par « efficacité énergétique », on entend globalement une meilleure utilisation de l'énergie disponible. On obtient un rendement énergétique plus élevé, tout en utilisant une faible quantité

de la ressource pour recevoir le même service. Ceci permet de réduire l'empreinte écologique, qui se traduit notamment par la réduction des émissions de gaz à effet de serre GES.

3.2. Avantages de l'efficacité énergétique

L'amélioration de l'efficacité énergétique est l'un des moyens les plus constructifs et les moins coûteux de relever les défis des prix élevés de l'énergie, de la sécurité et de l'indépendance énergétiques, de la pollution atmosphérique et du changement climatique mondial. Les nombreux avantages de l'efficacité énergétique comprennent:

- ✓ Environnemental: une efficacité accrue peut réduire les émissions de gaz à effet de serre et autres polluants, ainsi que la consommation d'eau.
- ✓ Économique : l'amélioration de l'efficacité énergétique coûte généralement moins cher que d'investir dans la nouvelle génération des bâtiments. L'efficacité énergétique peut également stimuler l'économie locale.
- ✓ Avantage aux systèmes de services publics: une fois intégrée aux plans de ressources énergétiques, l'efficacité énergétique peut offrir des avantages à long terme en réduisant la charge de base et la demande de pointe, ainsi que la nécessité de disposer d'actifs de production et de transport supplémentaires.
- ✓ Gestion des risques: l'efficacité énergétique diversifie également les portefeuilles de ressources des services publics et peut constituer une couverture contre les incertitudes liées aux fluctuations des prix du carburant et à d'autres facteurs de risque.

3.3. Certification énergétique des bâtiments

La certification énergétique des bâtiments comprend des programmes et des politiques qui évaluent la performance d'un bâtiment et ses systèmes de services énergétiques. Les systèmes d'évaluation des bâtiments durables aident les concepteurs à relever les défis environnementaux et à réduire l'empreinte carbone des bâtiments grâce à des exigences en matière de planification, de conception et de construction des installations à haute performance.

Différents systèmes de classification sont développés pour différents types de bâtiments et pour des structures nouvelles ou existantes. Elle peut être volontaire ou obligatoire pour tout ou une partie du secteur des bâtiments et de la construction. En citant les systèmes mondiaux suivant :

3.3.1. Passiv-Haus

Passiv-Haus est un label allemand de performance énergétique des bâtiments. Le label Passiv-Haus a pour but de créer des bâtiments passifs qui consomment très peu d'énergie en se basant sur l'utilisation des apports de chaleurs solaires, d'électroménagers, humaines, etc. La maison passive converse la chaleur de toutes ces sources à l'intérieur grâce à une isolation thermique de haute performance dans les murs, les sols, les toits et les fenêtres.

Les principaux critères du Label Passiv-Haus

-) Besoin de chaleur et chauffage : 15 kWh /m².an
-) Besoin énergie primaire : 120 kWh /m².an
-) Etanchéité à l'air : 0.6 v/h sous 50 Pascal
-) Ponts thermiques : 0.01 W/m.k

3.3.2. BBC-Effinergie

BBC-Effinergie est un label français de performance énergétique des bâtiments. Opter pour une construction ou un projet de construction labellisée BBC (Bâtiment Basse Consommation), c'est bénéficier d'un grand confort au sein de votre habitat, été comme hiver... grâce à des performances énergétiques élevées. De plus, investir dans un habitat BBC c'est aussi se garantir une facture d'énergie minimale.

Ce logement vous garantit une haute performance énergétique grâce à :

-) une isolation optimisée,
-) une bonne étanchéité à l'air, notamment aux endroits sensibles (fenêtres, portes),
-) une ventilation contrôlée permanente de type double flux, qui assure confort et qualité de l'air,
-) une orientation favorisant la lumière naturelle,
-) l'utilisation d'énergies renouvelables pour le chauffage, le rafraîchissement et l'eau chaude sanitaire.

Afin d'obtenir ce label, la consommation d'énergie dans le cas de logements neufs, ne doit pas dépasser les 50 kWh /m².an et aux cas de logement résidentiel existants ne doit pas dépasser 80 kWh /m².an.

3.3.3. MINERGIE

Le label Minergie est un label Suisse de confort et de performance énergétique pour les bâtiments neufs et rénovés.

Le label Minergie repose sur les piliers suivants : une bonne isolation de l'enveloppe du bâtiment, un approvisionnement énergétique hautement efficace basé sur les sources d'énergies renouvelables et un renouvellement contrôlé de l'air.

Il existe plusieurs labels disponibles en fonction des objectifs de performance.

- *MINERGIE – Standard*
Dans le neuf : 38 kWh/m² an
Dans la rénovation : 60 kWh/m² an
- *MINERGIE – P (Passif)*
30 kWh/m² an avec un besoin de chauffage inférieur à 15kWh/m²/an
- *MINERGIE ECO – MINERGIE P ECO*

Ce label est destiné à l'évaluation de la performance écologique (Certification depuis la Suisse).

3.3.4. LEED

Le label LEED (Leadership in Energy and Environmental Design) est un programme American de standardisation des bâtiments respectant des critères de haute qualité environnementale.

LEED permet d'évaluer l'impact et la performance environnementale des bâtiments. La certification LEED a pour objectif de promouvoir les bâtiments écologiques et de réduire leurs impacts environnementaux lors de leur construction et pendant leur exploitation.

Critères de labellisation

- ✓ Aménagement écologique des sites
- ✓ Gestion efficace de l'eau
- ✓ Énergie et atmosphère
- ✓ Matériaux et ressources
- ✓ Qualité des environnements intérieurs
- ✓ Innovation et processus de design

3.3.5. BREEAM

BREEAM « Building Research Establishment Environmental Assessment Method » est un standard Britannique de certification bâtiment le plus répandu à travers le monde. Chaque type de bâtiment a son référentiel d'évaluation (BREEAM Habitations, Etablissement scolaires, Hôpitaux, International, Tribunaux, Industriel, Bureaux, centres commerciaux, ...). L'évaluation BREEAM, simple et pragmatique, permet, grâce à une rapide analyse, de calculer la performance environnementale d'un bâtiment.

Critères de labellisation

- ✓ 10 catégories de problématiques environnementales : gestion, bien-être et santé, énergie, transport, matériaux, eau, déchets, paysage et écologie, pollution, innovation.
- ✓ Un système de pondération de ces catégories.
- ✓ Des outils d'évaluation de méthodes, produits et matériaux de construction.
- ✓ Une référence aux codes et standards locaux.

3.3.6. Label HQE

Haute Qualité Environnementale, Elle consiste à maîtriser les impacts de la construction sur l'environnement.

Un "bâtiment HQE" répond à une attente environnementale, au sens de qualité de vie, à la fois pour les usagers et pour la collectivité. Il doit être harmonieux avec son paysage, doit intégrer les services urbains (assainissement et écoulement des eaux pluviales, collecte sélective des déchets, réseaux de chaleur, bonne desserte en transports collectifs...), réduire les consommations de ressources naturelles (matériaux, énergie, eau...) et des rejets (gaz à effet de serre...).

Critères de labellisation

- L'écoconstruction
- L'éco-gestion
- Le confort
- La santé

3.3.7. BCA Green Mark

BCA Green Mark est un système d'évaluation de bâtiments écologiques basé à Singapour, utilisé pour évaluer l'impact et la performance d'un bâtiment. Il fournit un cadre complet pour évaluer la performance environnementale globale des bâtiments neufs et existants afin de promouvoir des pratiques de conception, de construction et d'exploitation durables dans les bâtiments.

Les critères d'évaluation couvrent:

- Efficacité énergétique
- Efficacité de l'eau
- Protection environnementale
- Qualité de l'environnement intérieur
- Autres fonctionnalités vertes et innovation.

En fonction de l'évaluation globale et de la notation des points, le bâtiment sera certifié pour avoir obtenu les certifications BCA Green Mark Platinum, Gold Plus, Gold et Certified.

3.4. Les normes de performance énergétique

NF EN 15217 (mars 2008) : Performance énergétique des bâtiments - Méthodes d'expression de la performance énergétique et de certification énergétique des bâtiments

NF EN 832 (août 1999) : Performance thermique des bâtiments - Calcul des besoins d'énergie pour le chauffage - Bâtiments résidentiels

NF EN ISO 10077-1 (décembre 2000) : Performance thermique des fenêtres, portes et fermetures - Calcul du coefficient de transmission thermique - Partie 1 : méthode simplifiée

NF EN ISO 10077-2 (juin 2004) : Performance thermique des fenêtres, portes et fermetures - Calcul du coefficient de transmission thermique - Partie 2 : méthode numérique pour les profilés de menuiserie

NF EN ISO 12569 (mai 2003) : Isolation thermique dans les bâtiments - Détermination du renouvellement d'air dans les bâtiments - Méthode de dilution de gaz traceurs

NF EN 13363-1+A1 (décembre 2007) : Dispositifs de protection solaire combinés à des vitrages - Calcul du facteur de transmission solaire et lumineuse - Partie 1 : méthode simplifiée

NF EN 13363-2 (novembre 2005) : Dispositifs de protection solaire combinés à des vitrages - Calcul du facteur de transmission solaire et lumineuse - Partie 2 : méthode de calcul détaillée

NF EN ISO 13370 (avril 2008) : Performance thermique des bâtiments - Transfert de chaleur par le sol - Méthodes de calcul

NF EN ISO 13786 (juillet 2008) : Performance thermique des composants de bâtiment - Caractéristiques thermiques dynamiques - Méthodes de calcul

NF EN ISO 13788 (décembre 2001) : Performance hygrothermique des composants et parois de bâtiments - Température superficielle intérieure permettant d'éviter l'humidité superficielle critique et la condensation dans la masse

EN ISO 13789 (avril 2008) : Performance thermique des bâtiments - Coefficient de transfert thermique par transmission et par renouvellement d'air - Méthode de calcul

NF EN ISO 13790 (novembre 2004) : Performance thermique des bâtiments - Calcul des besoins d'énergie pour le chauffage des locaux.

3.5. Types bâtiments à efficacité énergétique

3.5.1. L'écoconstruction

Combinaison des mots « écologie » et « construction », la notion d'écoconstruction est née dans les années soixante pour définir des bâtiments qui minimisent leurs besoins, ainsi que leur impact sur le site et sur l'environnement. Ces bâtiments sont intégrés le plus respectueusement possible dans leur milieu, et mettent en œuvre des ressources naturelles et locales (matériaux, entreprises, mais aussi soleil, eau, sol, etc.). Ils font appel à des matériaux abondamment et facilement disponibles, renouvelables, et non polluants : pierre, terre, bois, paille, chanvre, etc. L'écoconstruction s'inspire en cela de l'architecture vernaculaire et de ses principes de bon sens, de durabilité et d'économie de moyens, améliorée par des apports techniques permettant de tirer profit des énergies renouvelables : solaire passif, électricité solaire, éolienne, géothermie, puits canadien, etc.

3.5.2. L'architecture bioclimatique

Une maison bioclimatique vise, par sa conception architecturale, à optimiser les ressources du milieu pour en profiter de façon passive. Cela permet de limiter les équipements techniques « actifs », consommateurs d'énergie primaire : les systèmes de chauffage, de transformation de l'énergie solaire en électricité, etc. Les options architecturales diffèrent en fonction du climat, de la latitude, des savoir-faire locaux, des besoins, voire des cultures. En climat continental, dans l'hémisphère Nord, elles se traduisent généralement par une orientation des vitrages au sud pour profiter des apports solaires directs en vue d'un chauffage passif en hiver, avec en complément des protections solaires l'été. Un bâtiment compact permet de limiter les surfaces de façades et le refroidissement provoqué par les vents dominants, entraînant des déperditions de chaleur. Les pièces de service sont situées au nord pour faire office de tampons thermiques. L'autre aspect de l'architecture « bio »-climatique concerne la prise en compte de critères environnementaux dans le choix des procédés de construction et des matériaux.

3.5.3. Les maisons Basse consommation

Le concept de bâtiment basse consommation (BBC) met l'accent sur les économies d'énergie et l'aspect thermique. Selon certains, le plus important est de commencer par améliorer l'enveloppe du bâtiment pour limiter les déperditions thermiques. Cette démarche est depuis peu référencée sous la forme d'un label dénommé « BBC-Effinergie », qui atteste d'une

consommation de 50 kWh/ m²/an d'énergie primaire (avec des variantes selon la zone climatique et l'altitude). Elle comprend également un contrôle de l'étanchéité à l'air, qui doit être inférieur à 0,6 m³ par heure et par mètre carré. D'après l'association Effinergie, ces objectifs peuvent être atteints sans difficulté et à des coûts raisonnables avec des techniques et des matériaux actuels éprouvés

3.5.4. Les maisons passives

C'est en Allemagne qu'a été développé le concept de « Passiv-Haus ». Comme le label BBC français, il concerne des maisons à très faible consommation d'énergie, dont les performances, fixées par le Passiv-haus de Darmstadt, sont une consommation de 15 kWh/m²/an pour le chauffage, une consommation en énergie primaire inférieure à 120 kWh/m²/an et une excellente étanchéité à l'air. Ces résultats sont rendus possibles par une isolation renforcée et des apports en chauffage passif. Mais la norme Passiv-haus et le label suisse Minergie-P (sensiblement équivalent) insistent tous deux sur la sur isolation. Ce label allemand est délivré en France par l'association La Maison passive France. La limite de cette démarche réside dans le coût élevé des grandes épaisseurs d'isolants, des vitrages très performants et des équipements techniques. Il est en outre nécessaire de prévoir un appoint en chauffage pour pallier un manque d'ensoleillement de plusieurs jours

3.5.5. Les maisons à énergie positive

Elles produisent plus d'énergie qu'elles n'en consomment grâce à des équipements de production d'électricité (panneaux solaires, éoliennes, etc.). Le principe généralement appliqué est de revendre l'électricité produite à la société de production à un prix avantageux, ce qui permet d'éviter les problèmes de stockage et d'acheter l'électricité du réseau en cas de besoin.

3.5.6. Les maisons autonomes ou maisons zéro-énergie

Le principe des maisons autonomes est de produire directement l'énergie nécessaire au chauffage et à l'éclairage, sans dépendre d'un fournisseur extérieur, et de gérer son approvisionnement en eau (récupération de l'eau de pluie, des cours d'eau, etc.), ainsi que son traitement (par lagunage : l'eau est filtrée par les racines des plantes). Cette démarche va de pair avec une réduction de ses besoins et l'utilisation d'équipements peu gourmands en énergie. Elle implique un changement de comportement par rapport aux habitudes actuelles

4. Solution d'amélioration énergétique

Fournir un environnement intérieur confortable et sain est l'une des fonctions essentielles des systèmes énergétiques des bâtiments et représente environ un tiers de la consommation totale d'énergie des bâtiments. Les nouvelles technologies de chauffage, de climatisation et de ventilation peuvent non seulement générer d'importants gains d'efficacité, mais elles peuvent également améliorer la manière dont les systèmes de bâtiment répondent aux besoins et aux préférences des occupants en offrant un contrôle accru, en réduisant les variations de température indésirables et en améliorant la qualité de l'air intérieur. Les possibilités d'amélioration entrent dans les catégories de base suivantes:

- a) Bonne conception des bâtiments, y compris les systèmes passifs et l'aménagement paysager
- b) Amélioration de l'enveloppe du bâtiment, y compris les toits, les murs et les fenêtres
- c) Équipement amélioré pour chauffer et refroidir l'air et éliminer l'humidité
- d) Stockage d'énergie thermique pouvant faire partie de la structure du bâtiment ou d'un équipement séparé
- e) Capteurs, systèmes de contrôle et algorithmes de contrôle améliorés pour optimiser les performances du système.

La conception des bâtiments et la sélection des équipements dépendent du climat dans lequel le bâtiment fonctionne.

Pour contribuer à la performance énergétique des bâtiments, tout le monde s'accorde à dire qu'il existe principalement trois leviers qui peuvent être activés : les solutions passives, les solutions actives et le comportement des occupants.

4.1. Les solutions passives

Concerne le bâti, c'est-à-dire l'enveloppe du bâtiment uniquement. Cela consiste à éviter les déperditions d'énergie en renforçant la performance technique du bâtiment (isolation des murs, isolation des combles, étanchéité à l'air, triple vitrage...).

4.1.1. La compacité

D'un point de vue énergétique, (Boursas, 2013) il faut favoriser des bâtiments les plus compacts possibles. La compacité d'un bâtiment est un élément important de l'implantation car elle influence fortement les déperditions thermiques, l'emprise au sol et permet de limiter

l'étalement urbain. Elle est définie par un coefficient de compacité noté C indiqué sur la figure 1.2, qui correspond au rapport entre la surface extérieure totale et le volume habitable ($C=S/V$). Plus le coefficient est faible, plus le bâtiment est compact. Une bonne compacité intervient à partir d'un coefficient de compacité de 0,7.

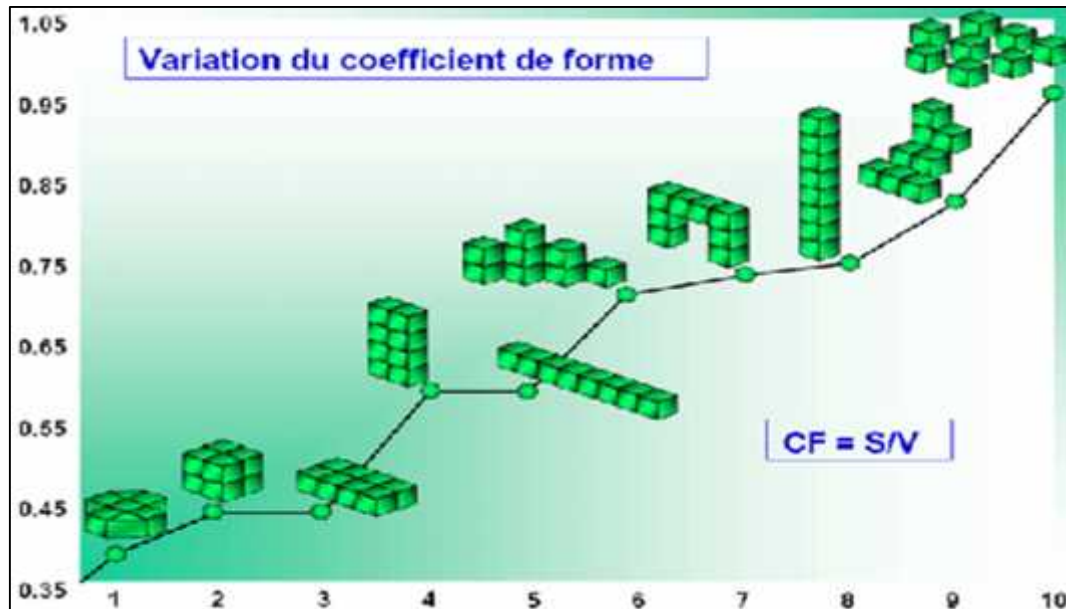


Figure 1.2 Variation de forme selon la géométrie de bâtiment.

4.1.2. Organisation des espaces de vie

Il est possible de limiter les consommations de chauffage et d'éclairage en organisant les espaces en fonction du mode d'occupation et de la course du soleil (Zekraoui, 2017). On placera :

- Au sud, les espaces de jour (salon et cuisine) nécessitant chaleur et lumière en journée
- Au nord, les espaces dits « tampons » (cellier, garage, pièces humides), peu utilisés et où le besoin de chaleur est absent ou ponctuel ;
- À l'est, à l'ouest ou au nord, les espaces de nuit (chambre) ou intermédiaires où le besoin de chaleur est réduit.

L'organisation spatiale dépend aussi du mode de vie de chacun figure 1.3 (chambre à l'est pour profiter du lever du soleil le matin et non à l'ouest pour limiter les risques de surchauffe) et de l'environnement : il n'existe donc pas de règle stricte.

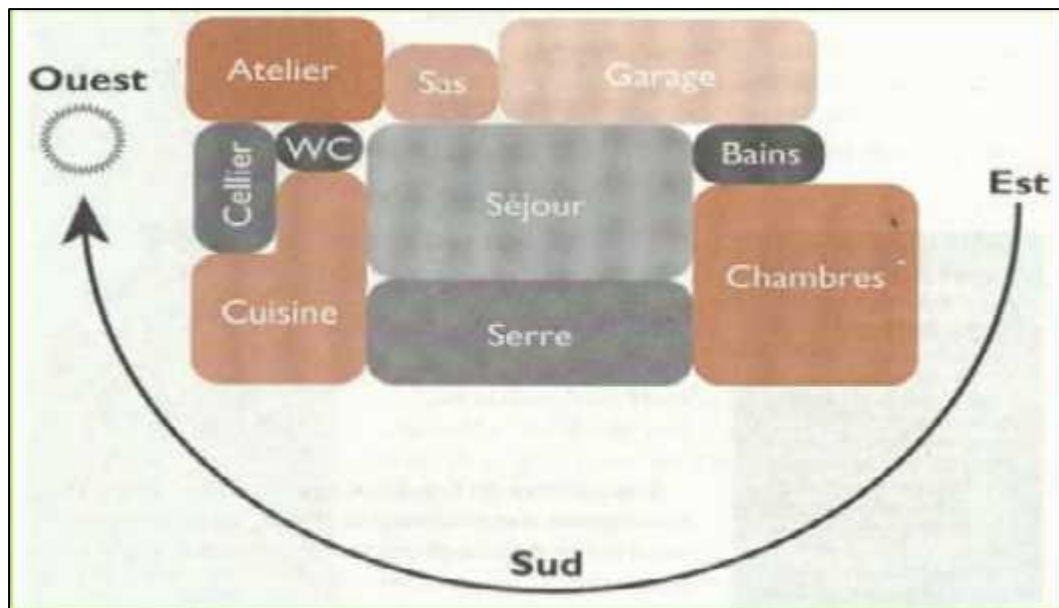


Figure 1.3 Organisation des espaces de vies selon l'orientation de soleil

Source : Thierry Salomon / Stéphane Bedel - La maison des négawatts

4.1.3. L'éclairage naturel des bâtiments

L'éclairage constitue un poste de dépense d'énergie très important dans les bâtiments. Voici quelques chiffres significatifs du l'UNEP¹ (Idelecplus, 2017) :

- ❖ *L'éclairage représente environ 15% de la consommation d'énergie dans le résidentiel.*
- ❖ *L'éclairage représente 30% des consommations électriques dans le non résidentiel.*
- ❖ *L'éclairage représente aujourd'hui 15% de la consommation mondiale d'électricité.*
- ❖ *L'éclairage est responsable de 5% des émissions de gaz à effet de serre (GES).*

➤ Stratégie de l'éclairage naturel

Cependant, dans un contexte de développement durable, la stratégie de l'éclairage naturel a un impact important sur l'amélioration de l'efficacité énergétique des bâtiments et permet non seulement la réduction des charges d'éclairage électrique mais aussi de celles de refroidissement des bâtiments (Magali, 2007).

La stratégie de l'éclairage naturel a pour but de répondre aux exigences de confort des occupants, tout en réduisant la consommation d'énergie du bâtiment. Elle est l'étude de la relation entre la lumière naturelle et le bâtiment selon cinq concepts destinés à favoriser la meilleure utilisation possible de la lumière naturelle.

¹ Programme des Nations Unies pour l'Environnement

a) Capter

Capter la lumière du jour consiste à la recueillir pour éclairer naturellement un bâtiment.

b) Transmettre

Transmettre la lumière naturelle consiste à favoriser sa pénétration à l'intérieur d'un local. La pénétration de la lumière dans un espace est influencée par les caractéristiques de l'ouverture.

c) Distribuer

Distribuer la lumière naturelle consiste à diriger et à transporter ses rayons lumineux de manière à créer une bonne répartition de la lumière naturelle dans le bâtiment. La difficulté d'utilisation de la lumière naturelle par rapport à la lumière artificielle réside dans la grande inhomogénéité des éclairagements qu'elle induit en général

d) Se protéger

Se protéger de la lumière naturelle consiste à arrêter partiellement ou totalement les rayonnements lumineux lorsqu'ils induisent de l'éblouissement pour les occupants d'un bâtiment.

e) Contrôler

Contrôler la lumière consiste à gérer la quantité et la distribution de la lumière dans un espace en fonction de la variation des conditions climatiques et des besoins des occupants.

L'efficacité des différents moyens de gestion de la lumière naturelle dépend en grande partie de l'acceptation du système par les utilisateurs et de l'automatisation des commandes de ces systèmes ; elle est également liée au climat, au lieu considéré, au perfectionnement du système et à la taille de la zone contrôlée.

4.1.4. Proportion de surface vitrée

L'impact visuel d'une fenestration généreuse est souhaitable. Le défi consiste à choisir les emplacements les plus judicieux pour les ouvertures de façon à maximiser la vue et l'éclairage naturel, tout en évitant l'éblouissement et en minimisant la surchauffe et les pertes thermiques.

Pour assurer le confort thermique et strictement celui-ci, il conviendrait de limiter autant que possible toute surface vitrée. En effet, elles sont source de :

-) Déperditions thermiques défavorables au confort thermique en hiver ;
-) Apports solaires d'été sources de risque de surchauffe.

Néanmoins, selon Zekraoui (2017) réduire les surfaces vitrées de façon exagérée aura un impact négatif sur,

-) L'éclairage naturel et donc le confort visuel ainsi que les consommations énergétiques en éclairage artificiel
-) La vue et le contact avec l'environnement extérieur
-) Les possibilités de rafraîchissement passif par la mise en place d'une ventilation naturelle
-) Les apports solaires gratuits en hiver qui permettent de réduire les besoins de chaud

La conception des surfaces vitrées résulte donc d'un compromis entre ces différents objectifs.

On retiendra néanmoins ce principe :

Éviter les allèges vitrées qui n'apportent pas d'éclairage naturel utile et sont source de déperditions et apports solaires préjudiciables au confort d'été. Seules exceptions :

-) Dans les bâtiments où les apports internes sont faibles comme dans le logement et au sud, voire au sud-est et au sud-ouest, seules orientations pour lesquelles les apports gratuits peuvent compenser les déperditions
-) Pour des raisons de vue ... ou d'intégration architecturale et urbanistique

Enfin, on veillera également à éviter une surface vitrée exagérément grande dans les locaux de coin. Cette situation engendre en effet souvent des situations d'inconfort :

-) Les déperditions sont plus importantes et doivent être compensées par une plus grande puissance de chauffage.
-) De même les charges solaires sont plus importantes et doivent être compensées par une plus grande puissance de chauffage.
-) Les solutions adoptées dans les locaux voisins peuvent être insuffisantes dans ces locaux spécifiques (par exemple chauffage sol, ou plafond froid) et des solutions doivent être trouvées pour apporter la puissance complémentaire.

4.1.5. Le vitrage

Les fenêtres et les composants de vitrage sont essentiels pour la performance durable de l'enveloppe du bâtiment. Cette section examine les choix appropriés pour fenêtres plus durables, puits de lumière (*lucarnes*), et la composition de vitrage. Examine les options pour les cadres de fenêtres et des matériaux de fabrication des cadres, y compris l'aluminium, le bois, le vinyle, les options hybrides, Ets. Ces choix, lorsqu'ils sont faits dans une optique de

durabilité, peuvent avoir un impact positif important sur la consommation d'énergie et l'environnement.

4.1.5.1. Propriétés de vitrages

Les fenêtres, les portes et les puits de lumière peuvent gagner et perdre de la chaleur grâce à:

- ✓ Conduction directe à travers le verre ou le vitrage, le cadre et / ou la porte;
- ✓ Le rayonnement de chaleur dans un bâtiment (généralement du soleil) et hors d'un bâtiment par des objets de la pièce, tels que des meubles, des murs intérieurs et des personnes.

Ces caractéristiques de performance énergétique sont mesurées et évalué (Maaden, et al, 2016) par:

1. Coefficient de transmission thermique U

La valeur U indique le débit de chaleur dû à la conduction, à la convection et au rayonnement à travers une fenêtre, résultant d'une différence de température entre l'intérieur et l'extérieur. Plus le coefficient est élevé, plus la chaleur est transférée (perdue) par la fenêtre en hiver. Les unités de valeur U sont: Btus par heure par pied carré et par ° F (Btu / h · ft² · ° F) ou (W/m²/k)

Les coefficients U vont généralement de 1,3 (pour une fenêtre à vitrage simple à cadre en aluminium typique) à environ 0,2 (pour une fenêtre à vitres multiples et hautes performances avec des revêtements à faible émissivité et des cadres isolés).

Une fenêtre avec un facteur U de 0,6 perdra deux fois plus de chaleur dans les mêmes conditions qu'une fenêtre avec un facteur U de 0,3.

Les coefficients U totaux (ou nets) de fenêtre peuvent être considérablement plus élevés que les coefficients U de centre de verre.

Plus le coefficient U est bas, plus la fenêtre, la porte ou la lucarne est économe en énergie.

2. Coefficient de gain de chaleur solaire (SHGC)

Le SHGC (Solar Heat Gain Coefficient) indique la quantité d'énergie solaire frappant la fenêtre qui est transmise par la fenêtre sous forme de chaleur. Au fur et à mesure que le SHGC augmente, le potentiel de gain solaire à travers une fenêtre donnée augmente (Mersal, 2017).

Le SHGC est un rapport compris entre 0 et 1. $SHGC = 0$ signifie qu'aucun du gain solaire incident n'est transmis à travers la fenêtre sous forme de chaleur et $SHGC = 1$ signifie que toute l'énergie solaire incidente est transmise à travers la fenêtre sous forme de chaleur.

Une fenêtre avec un SHGC de 0,6 admettra deux fois plus de gain de chaleur solaire qu'une fenêtre avec un SHGC de 0,3.

En règle générale, les fenêtres avec de faibles valeurs de SHGC sont souhaitables dans les bâtiments avec des charges de climatisation élevées, tandis que les fenêtres avec des valeurs de SHGC élevées sont souhaitables dans les bâtiments où le chauffage solaire passif est nécessaire. Le climat, l'orientation et l'ombrage extérieur d'un bâtiment détermineront le SHGC optimal pour une fenêtre, une porte ou un puits de lumière particulier.

Le terme "SHGC" est relativement nouveau et vise à remplacer le terme "coefficient d'ombrage (SC)". Bien que les termes soient liés, le coefficient d'ombrage du verre est défini comme le rapport du gain de chaleur solaire à travers un vitrage par rapport à celui du verre clair à vitre simple de 1/8 pouce.

3. La transmittance visible (VT)

Une fraction du spectre visible de la lumière solaire (380 à 720 nanomètres) transmise à travers le vitrage d'une fenêtre,

La lumière solaire est une forme d'échange électromagnétique d'énergie entre le soleil et la terre. Il est composé d'une gamme de longueurs d'onde électromagnétiques, généralement classées dans les catégories ultraviolettes (UV), visible et infrarouge (IR), désignées collectivement sous le nom de spectre solaire.

Les courtes longueurs d'onde UV sont en grande partie invisibles à l'œil nu, mais sont responsables de la décoloration du tissu et des dommages cutanés. La lumière visible est constituée de ces longueurs d'onde détectables par l'œil humain. Cette lumière contient environ 47% de l'énergie solaire. Les longueurs d'ondes infrarouges plus longues sont également invisibles et contiennent environ 46% de l'énergie sous la lumière du soleil.

Pour un système de vitrage donné, le terme "indice de fraîcheur (K_e)", également appelé facteur d'efficacité, est le rapport du verre T_{vis} au Coefficient de gain de chaleur solaire de la fenêtre (SHGC).

4.1.5.2. Types de fenêtres et de lucarnes

Plusieurs types de fenêtres et de cadres communs sont brièvement décrits en fonction de leurs contributions à la durabilité de la conception de l'enveloppe du bâtiment. Les fenêtres et les puits de lumière sont fabriqués avec des cadres différents pour répondre aux différents besoins de conception. Ces cadres sont en aluminium, en aluminium avec coupures thermiques, en bois, en vêtu bois, en vinyle, en vinyle isolant, en matériaux composites, en fibre de verre et en hybride / double hybride. Ces différentes cadres donnent à la fenêtre des propriétés de gain solaire différentes. Les fabricants seront en mesure de fournir des spécifications détaillées pour leurs fenêtres et puits de lumière. Dans tous ces cas, trois propriétés importantes doivent être prises en compte: facteur U, SHGC et VT, ainsi que les codes locaux.

En raison de la nature de leur conception, figure 1.4 montre certains styles de fenêtre sont plus éco-énergétiques (Mersal, 2017) que les autres :



Figure 1.4 Les différents modèles de fenêtre.

4.1.5.3. Vitrage à haute performance

Il y a beaucoup de bâtiments commerciaux de haute performance dans le monde. Des systèmes de fenêtres et de vitrages à hautes performances et économes en énergie peuvent réduire considérablement la consommation d'énergie et, partant, la pollution. Ces systèmes de vitrage ont une perte de chaleur plus faible (effet de conduction), moins de fuite d'air (effet de convection) et des surfaces de fenêtre plus chaudes qui améliorent le confort et minimisent la condensation (créant une vision claire). Les fenêtres hautes performances sont dotées d'un double ou triple vitrage, de revêtements transparents spécialisés (low-E), de gaz isolant (argon ou krypton) entre les vitres et de cadres améliorés figure 1.5.

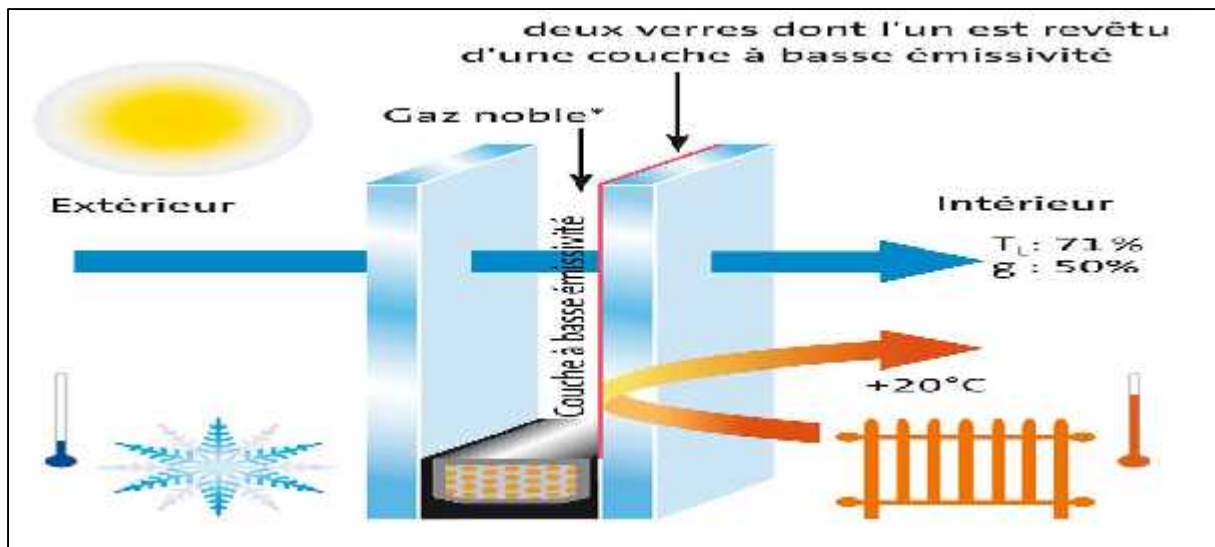


Figure 1.5 Principe de double vitrage avec couche à basse émissivité.

Source, <https://www.vie-veranda.com/blog/12/vitrage-haute-performance>

Pour les fenêtres hautes performances:

Les valeurs U sont autour de 0,2 pour une fenêtre multi-vitres haute performance avec des revêtements à faible émissivité et des cadres isolés.

SHGC est 0-1.00. Les fenêtres à faible valeur sont souhaitables dans les bâtiments à forte charge de climatisation (climats chauds), tandis que les fenêtres à des valeurs de SHGC élevées sont souhaitables dans les bâtiments où un chauffage solaire passif (climats froids) est nécessaire

4.1.6. Protections solaires

Les protections solaires doivent limiter les charges solaires et donc le risque de surchauffe en été voire en mi saison, tout en permettant un bon éclairage naturel et si possible la pénétration du soleil dans les locaux en hiver. Elles seront donc adaptées à la fois (Bennadji et Sahli, 2016),

-)] À l'orientation de la façade
-)] À la fonction et à l'utilisation du local qu'elles protègent : selon les apports internes du local/du bâtiment, les apports solaires de mi-saison et d'été sont plus ou moins les bienvenus.

Par exemple,

-)] En façades Sud, S-E et S-O on privilégiera les protections solaires fixes figure 1.6 qui permettent de valoriser les apports solaires gratuits d'hiver et apportent une protection solaire efficace en été, en demandant très peu d'entretien.

- J) En façades Est et Ouest, on envisagera la mise en place de stores mobiles figure 1.7 extérieurs : screens plus ou moins opaques, lamelles,...



Figure 1.6 Protection solaire extérieur fixe.

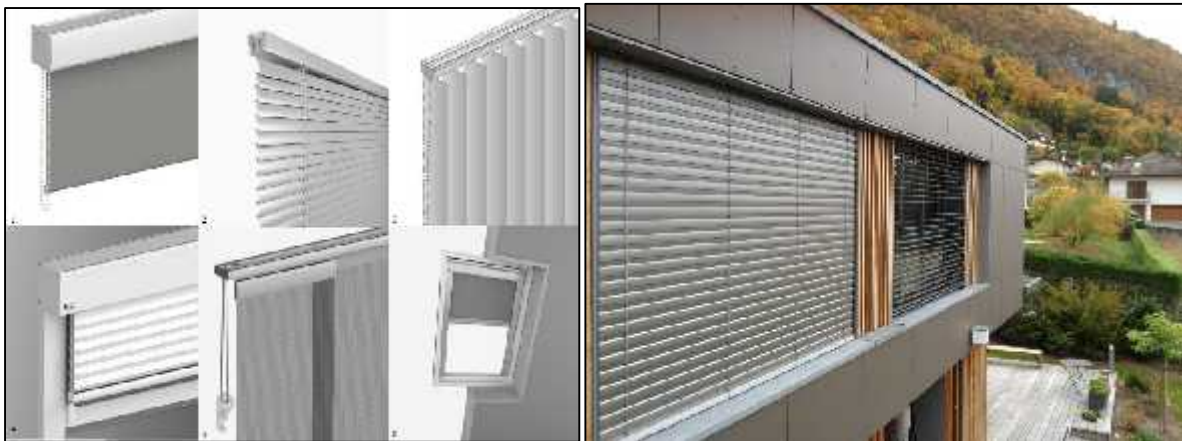


Figure 1.7 Protection solaire extérieur mobile.

Enfin, une alternative aux protections solaires fixes ou mobiles est le choix d'un vitrage spécifique. Il présente l'avantage d'offrir une protection solaire efficace sans entretien complémentaire. Néanmoins, il aura un impact sur la qualité de l'éclairage naturel (plus ou moins important selon qu'on choisit un vitrage sélectif ou un vitrage solaire) et limitera les apports solaires gratuits en hiver.

➤ La couleur des parois

Les couleurs ont des coefficients d'absorption du rayonnement solaire différents, elles peuvent donc faire partie des protections solaires.

Selon (Givoni, 1987): « *Ce paramètre varie avec le facteur d'absorption (couleur) des surfaces externes; les surfaces blanches absorbent seulement à peu près 15 % du rayonnement incident; les couleurs claires ordinaires, telles que le blanc crème ou le gris clair absorbent 40 à 50 %,*

les couleurs sombres moyennes (gris foncé, vert, rouge, etc.) 60 à 70 % et les surfaces noires 80 à 90 % »

4.1.7. Enveloppe du bâtiment

L'enveloppe du bâtiment doit transformer les agressions extérieures en confort pour ses occupants. Cependant, les transferts de chaleur à travers le bâtiment représentent souvent la plus grande perte d'énergie pour celui-ci (développé dans le chapitre 2). Les besoins en chauffage et en climatisation seront plus ou moins importants selon les propriétés de l'enveloppe (Boursas, 2013): plus elle est performante, moins il sera nécessaire d'avoir recours aux systèmes énergétiques pour tempérer le bâtiment, et plus la consommation d'énergie sera faible.

Le niveau d'isolation de tous les points de l'enveloppe doit être le même pour éviter les ponts thermiques (discontinuité dans la couche isolante), ces derniers pouvant compromettre les efforts investis dans l'isolation en causant d'importantes pertes thermiques. Une enveloppe performante se doit de garantir une étanchéité suffisante en limitant au maximum les infiltrations et exfiltrations d'air inopportunes. La figure 1.8 ci-dessous représente les pourcentages de déperdition de chaleur pour chaque composant de l'enveloppe.

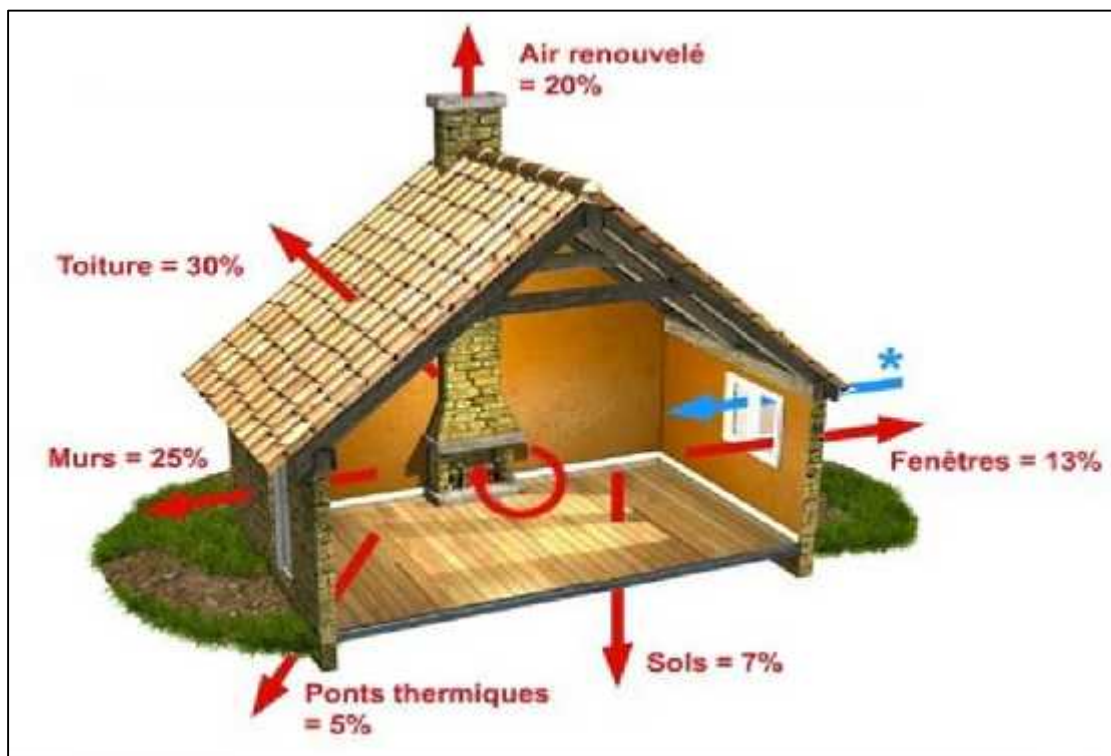


Figure 1.8 Les sources de déperdition de chaleur de l'enveloppe d'un bâtiment

4.1.7.1. Les ponts thermiques

Un pont thermique est une faiblesse dans l'enveloppe d'un bâtiment à travers laquelle les calories passeront en priorité. Les ponts thermiques se trouvent à différents endroits d'une enveloppe :

- ✓ Jonction entre 2 parois ;
- ✓ Jonction entre une paroi intérieure et une paroi donnant sur l'extérieur (mur de refend/terrasse, chape/balcon, chape/mur extérieur) ;
- ✓ Pourtour de baies vitrées, de portes ;
- ✓ Ouvertures techniques (prises électriques, serrures...).

Très présents dans les bâtiments isolés par l'intérieur, les ponts thermiques peuvent représenter jusqu'à 15% des déperditions totales des parois.

4.1.7.2. L'inertie thermique

L'inertie thermique est une grandeur qui caractérise le retard et l'amortissement que subit une onde thermique avant d'atteindre l'intérieur. L'inertie dépend de plusieurs paramètres à savoir : l'isolation thermique, les caractéristiques thermiques des matériaux de construction (conductivité thermique, chaleur spécifique, masse volumique). Une bonne inertie thermique est celle qui produit une ambiance thermique intérieure stable, non soumise aux variations des conditions extérieures.

Plus les murs sont épais et les matériaux lourds (béton, pierre, brique pleine, terre crue, etc.), plus l'inertie est grande, de ce fait, la construction se réchauffe et se refroidit lentement. Elle a deux caractéristiques :

La diffusivité thermique : correspond à la vitesse d'avancement d'un front de chaleur à travers le matériau (unité : m^2/h).

L'effusivité thermique : représente la capacité d'un matériau à absorber un flux de chaleur instantané (unité : $(\text{W}/^\circ\text{C m}^2)$)

4.1.7.3. Isolation thermique

Le rôle de l'isolation thermique est de s'opposer au passage des flux de chaleur qui tendent à traverser la paroi, de l'ambiance la plus chaude vers la plus froide. En saison froide, ce mouvement va de l'intérieur vers l'extérieur. En été, c'est l'inverse.

L'isolation thermique se mesure selon différents paramètres énergétiques :

La résistance thermique (notée R en $\text{m}^2.\text{K}/\text{W}$), correspond à la capacité du matériau à ne pas laisser passer la chaleur. Plus R est grand, plus le matériau est performant. R est fonction de l'épaisseur (quand on double une épaisseur, on double R).

La conductivité thermique (notée λ : lambda en $\text{W}/\text{m.K}$), correspond à la quantité de chaleur qui traverse le matériau. Plus λ est petit, plus le matériau est isolant. Pour un bon isolant, le coefficient λ doit être le plus faible possible, idéalement compris entre 0,04 et 0,03.

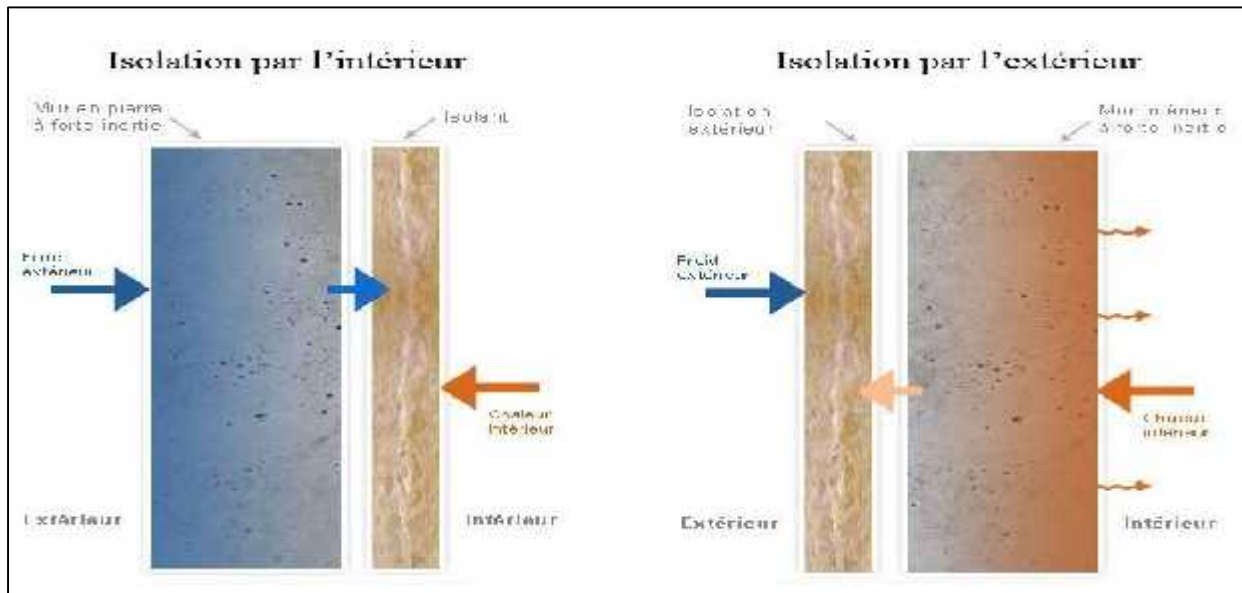


Figure 1.9 Isolation par intérieur et par extérieur

Source : <https://www.ma-maison-container.fr/isolation/>

4.1.7.4. Les différents types d'isolation

En réhabilitation, il est possible d'isoler un bâtiment soit à l'intérieur soit à l'extérieur de la structure porteuse figure 1.9. Impliquant bien souvent des modifications d'aspect de l'habitat,

L'isolation par l'extérieur se révèle être la solution la plus performante. Cette solution permet de limiter les ponts thermiques et de bénéficier de l'inertie apportée par la masse des parois. Pour finir, aucune réfection des équipements intérieurs n'est nécessaire et les habitants peuvent continuer d'utiliser le bâtiment hors des travaux.

L'isolation par l'intérieur, quant à elle, est une alternative intéressante. En effet, bien qu'elle puisse légèrement empiéter sur la périphérie des pièces, cette solution est rapide et facile à mettre en œuvre.

4.1.7.5. Les différents matériaux isolants, 4 grandes familles

- Les isolants synthétiques qui sont produits par l'industrie du pétrole, le plus souvent à partir d'un ou plusieurs dérivés du processus de raffinage : polystyrène expansé ou extrudé, polyuréthane...
- Les isolants d'origine minérale sont issus de matières premières minérales (silice, argile, roches volcaniques...) : laines de roche et de verre, verre cellulaire, perlite, vermiculite, argile expansé...
- Les isolants d'origine végétale sont les plus couramment employés en construction écologique : laine et fibre de bois, laine de chanvre, de coton, de coco, de lin, ouate de cellulose, liège, bottes de paille...
- Les isolants d'origine animale : laine de mouton, plumes de canard...

4.1.7.6. Les façades ventilées

La ventilation des façades double-peau (façade ventilée) figure 1.10 peut s'effectuer de manière mécanique (à l'aide de ventilateurs), de manière naturelle (en utilisant le tirage thermique et l'effet du vent) ainsi que de manière hybride (en utilisant une combinaison contrôlée des deux modes précédents). La ventilation naturelle est la plus difficile à contrôler car son efficacité dépend des conditions extérieures : direction et vitesse du vent, et ensoleillement. Le tirage thermique (ou effet cheminée) permet à l'air qui s'est échauffé de sortir par le haut de la cavité créant ainsi une circulation verticale. Les façades double-peau étant principalement intégrées sur des immeubles de bureaux, la ventilation naturelle est généralement assistée d'une ventilation mécanique afin de garantir les performances de la façade dans le temps.



Figure 1.10 Composition d'une façade double-peau (façade ventilée)

4.1.8. La ventilation des bâtiments

La ventilation d'un bâtiment s'effectue en prélevant de l'air extérieur neuf dans l'environnement du bâtiment et en y rejetant l'air vicié. Cette circulation d'air peut être naturelle, grâce à des ouvertures dans l'enveloppe du bâtiment, ou mécanique à l'aide de ventilateurs qui assurent un débit d'air contrôlé.

La différence de température extérieure estivale entre le jour et la nuit peut alors être exploitée pour rafraîchir les bâtiments : on peut augmenter alors le débit de ventilation, soit en multipliant les entrées et sorties d'air (ouverture des fenêtres) en ventilation naturelle, soit directement par le contrôle de la ventilation mécanique (vitesse des ventilateurs). On parle alors de ventilation, ou de sur-ventilation, nocturne (Lou Chesne, 2012).

La ventilation naturelle est l'un des moyens les plus simples de contribuer au confort thermique des usagers d'un bâtiment et l'amélioration la performance des bâtiments, selon une étude d'ARENE, avec une humidité de 50 %, un courant d'air de 0,5m/s donne sur la peau nue, une sensation d'abaissement de la température de l'air de 3,5°C. La ventilation est conditionnée par les éléments suivants :

- L'orientation par rapport à la direction du vent.
- La position des ouvertures sur les façades.
- Dimensionner des ouvertures et les dispositifs qui favorisent les écoulements d'air dans les espaces intérieures.
- L'éloignement du bâti par rapport aux obstacles de l'écoulement du vent.

4.2. Les solutions actives

Combinent une amélioration du rendement énergétique des équipements techniques (chaudière, éclairage...) et une gestion de l'énergie basée sur la mesure, le pilotage et la régulation des énergies du bâtiment selon les usages.

4.2.1. Capteurs, contrôles et réseaux

L'éclairage, les fenêtres, le matériel de CVC (Climatisation, Ventilation, Chauffage), les chauffe-eau et d'autres équipements du bâtiment commencent à être équipés de contrôleurs intelligents et souvent de capacités de communication sans fil.

Ces systèmes offrent de nombreuses possibilités d'améliorer l'efficacité des bâtiments, de gérer les pointes de charge et de fournir des services utiles pour maîtriser les coûts. Des grands systèmes utilitaires.

Ils offrent également de nombreux avantages non énergétiques pouvant intéresser davantage les propriétaires et les occupants de bâtiments que la seule utilisation de l'énergie. Celles-ci incluent l'amélioration de la sécurité, du contrôle d'accès, de la détection et de la gestion des incendies et autres urgences, ainsi que l'identification des problèmes de maintenance avant qu'ils ne conduisent à de graves problèmes.

Les capteurs et les commandes à faible coût permettent également aux utilisateurs de mieux contrôler les conditions thermiques et d'éclairage. S'ils s'autoalimentent à l'aide de la lumière, des vibrations ou des champs générés par les lignes AC, l'installation est simplifiée.


4.2.1.1. Les attentes des systèmes de contrôle










- ✓ Contrôler la température de la pièce, l'humidité, les taux de ventilation, les fenêtres ajustables, les persiennes variables, lumières à intensité variable
- ✓ Contrôlez les principaux appareils: la plupart des appareils sont contrôlés en les allumant ou les éteignant, mais la nouvelle génération d'appareils permet un réglage plus sophistiqué du fonctionnement.
- ✓ Utiliser les prévisions météorologiques pour développer des stratégies optimales de préchauffage ou de refroidissement de la structure
- ✓ Détectez et identifiez les défaillances des composants et recherchez les signes indiquant que l'équipement est sur le point de tomber en panne.
- ✓ Adapter les performances en réponse aux communications des services publics à l'aide de nouvelles structures tarifaires afin de minimiser les coûts généraux du système
- ✓ Apprendre et anticiper les comportements des utilisateurs, y compris s'adapter aux vacances et intégrer leurs préférences de manière dynamique.

Les bâtiments étant responsables de plus de 76 % de la demande en électricité, les systèmes de contrôle des bâtiments peuvent également jouer un rôle majeur dans l'optimisation des performances du réseau électrique de prochaine génération

4.2.2. La conception durable des systèmes CVC

La conception durable de nouveaux éléments peut suivre les normes actuelles en matière de durabilité. Les bonnes pratiques durables s'appliquent aux rénovations et à toute nouvelle conception de CVC. Ces principes directeurs doivent être traités afin d'assurer l'efficacité énergétique des systèmes CVC:

-  Optimiser les contrôles. Utilisation de commandes pour fournir le chauffage et la climatisation uniquement en cas de besoin.

-  Optimiser la capacité. Examinez la capacité du système pour la durabilité et évitez de prouver une capacité excessive. Notez que l'utilisation de systèmes passifs, réduisant la chaleur provenant de l'éclairage, etc., doit être envisagée.
-  Réduisez la charge. Minimisez les charges de chauffage et de climatisation en réduisant l'infiltration, les charges de chaleur solaire par une orientation appropriée, etc.
-  Chauffer et refroidir les gens, pas le bâtiment. Fournissez le chauffage et la climatisation là où les gens travaillent plutôt que les espaces inutilisés. Il existe des exceptions telles que certains équipements informatiques, certaines zones chirurgicales et la protection contre le gel.
-  Utilisez des processus efficaces. Sélectionnez le processus de chauffage et de refroidissement le plus efficace pour les personnes, le climat et le bâtiment. Personnaliser pour des utilisations spéciales, telles que système à une passe dans les salles d'opération, produits chimiques contaminants, etc. Pour un bureau, un système de recirculation peut être approprié.
-  Utilisez un équipement efficace. Sélectionnez les équipements les plus efficaces tels que les systèmes EER et Energy Star.
-  Utiliser l'équipement efficacement. Assurez-vous que l'équipement fonctionne efficacement et corrigez toute lacune par un entretien régulier.
-  Utilisez des concepts passifs. Profitez des propriétés de construction et le climat pour faire autant de travail de chauffage et de refroidissement que possible. Les murs Trombe, les serres et les systèmes de refroidissement nocturne sur le toit en sont quelques exemples.
-  Utiliser la chaleur et récupérer le froid. La chaleur et le refroidissement peuvent être récupérés à partir du bâtiment, des gaz d'échappement du bâtiment et d'autres sources.
-  Envisagez la capacité de stockage d'énergie. L'énergie stockée peut permettre une utilisation en période creuse (stockage au frais après les heures creuses), un nivellement de la charge et une utilisation plus efficace de l'équipement.

4.2.3. Famille des systèmes CVC

4.2.3.1. Systèmes décentralisés

Les systèmes décentralisés servent une zone unique et sont installés à proximité ou à l'intérieur de l'espace qu'ils conditionnent. Ce type de système peut être facilement utilisable dans la plupart des bâtiments. Pour ce type de système, le refroidissement de l'air se produit par

expansion directe. Le coût d'achat, la facilité d'installation et le peu d'espace de plancher qu'ils occupent dans la salle 456 mécanique en font une option intéressante.

Les systèmes décentralisés sont plus appropriés pour les bâtiments de petite ou de moyenne taille sans zones thermiques multiples (Forgues, 2016).

4.2.3.2. Systèmes centralisés

Les systèmes centralisés regroupent les équipements requis pour le chauffage et la climatisation de nombreux espaces dans un même endroit. Le refroidissement est pratiquement toujours fourni à l'aide d'une boucle d'eau glacée produite par un refroidisseur et distribuée par un réseau de tuyaux aux unités de traitement d'air ou aux ventilo-convecteurs situés dans les espaces. Similairement, une chaudière est utilisée pour produire de l'eau chaude qui sera distribuée aux unités de traitement de l'air. Les systèmes centralisés permettent un meilleur contrôle des conditions de confort avec une efficacité énergétique supérieure et un plus grand potentiel de gestion de la charge et de la récupération de chaleur (Forgues, 2016). Les systèmes centralisés sont plus appropriés pour les bâtiments de grande taille à zone thermique multiple.

4.2.3.3. Systèmes de distribution de l'air

Les systèmes de distribution de l'air peuvent être conçus pour répondre aux besoins en apport d'air extérieur, en refroidissement sensible et latent, en préchauffage, en humidification et en déshumidification. Dans la majorité des cas, aucun refroidissement supplémentaire ni humidification n'est alors nécessaire dans la zone. Le même système peut aussi répondre aux besoins de chauffage, soit dans l'unité principale ou dans la zone. Dans certaines applications, le chauffage provient d'une autre source de chaleur.

Le principe de fonctionnement d'un tel système est basé sur l'alimentation en air d'une pièce à des conditions permettant l'absorption des gains de chaleur sensible et latente de l'espace afin d'atteindre les conditions ambiantes souhaitées. Puisque les gains de chaleur dans l'espace fluctuent dans le temps, une stratégie est requise pour y arriver. Les deux principales stratégies dans ce cas sont :

- 1) faire varier la quantité d'air d'alimentation en variant le débit ou fournir de l'air par intermittence; ou
- 2) faire varier la température de l'air d'alimentation, soit en modulant la température ou en conditionnant l'air de façon intermittente.

4.2.4. Les énergies renouvelables

L'exploitation des énergies naturelles et renouvelables que procurent le soleil, le vent, l'eau en mouvement, la terre et la biomasse contribue à améliorer la durabilité de notre production énergétique en plus d'aboutir à des avantages sur le plan de l'environnement et de la santé humaine. Tout en étant renouvelables pour les futures générations, ces formes d'énergie n'entraînent aucune augmentation des niveaux de dioxyde de carbone ou d'autres agents polluants dans l'atmosphère terrestre. Les technologies d'énergies renouvelables représentent l'un des marchés avec le taux de croissance le plus rapide au monde actuellement

Selon la localisation et l'environnement du bâtiment, diverses sources d'énergie renouvelable peuvent être utilisées, seules ou de façon complémentaire.

- ✓ **Énergie solaire** : des panneaux solaires thermiques ou photovoltaïques peuvent être installés sur la toiture ou autour de l'immeuble, intégrés directement à sa façade ou encore disposés sur des abris de parking. Par exemple, Green Office® Meudon est doté de 4 200 m² de panneaux photovoltaïques présenté dans la figure 1.11, dont la production est revendue au concessionnaire.
- ✓ **Biomasse** : des matières organiques d'origine végétale, animale ou fongique sont utilisées comme source d'énergie par combustion. Par exemple, Green Office Meudon® est équipé d'une chaudière cogénération, qui produit simultanément chaleur et électricité, fonctionnant à l'huile de colza produite en région parisienne. Cette chaudière couvre 100 % des besoins en chaleur et 55 % des besoins électriques du bâtiment.
- ✓ **Géothermie** : qu'elle soit sur sonde ou sur nappe phréatique, la géothermie permet de transformer la chaleur contenue dans le sol pour alimenter les immeubles en énergie. Par exemple, les études hydrauliques menées autour de Green Office® Rueil ont montré que la nappe présente disposait d'un débit suffisant pour couvrir les besoins énergétiques de l'immeuble.



Figure 1.11 Intégration des énergies renouvelables des bâtiments « Green Office® Meudon. Architecte »

4.2.5. Les pompes à chaleur (PAC)

Une pompe à chaleur est un moyen de chauffage thermodynamique, considérée comme une énergie renouvelable, qui consiste à puiser les calories contenues au sein d'une source froide existante (comme l'air, le sol, l'eau...) pour les restituer à une température plus élevée à l'intérieur d'une source chaude (bâtiment, logement...).

On distingue plusieurs types de pompes à chaleur, principalement en fonction de la source froide utilisée (sol, eau, air...) et du système de diffusion thermique (plancher chauffant, radiateur...). Chaque type de PAC (Idelecplus, 2017) a ses propres avantages et inconvénients. Mais d'une manière générale, les pompes à chaleur offrent de très bons rendements, peuvent être réversibles (donc de climatiser pendant l'été) et permettent de faire des économies d'énergie considérables. Elles peuvent en effet présenter un coefficient de performance (ou COP) allant jusqu'à 7. Un COP de 7 permet de restituer 7 kWh d'énergie thermique pour 1 kWh d'énergie électrique consommée.

Plus ce rapport est élevé, plus la consommation en énergie est basse, plus la facture d'électricité baisse. Etant considérées comme des systèmes d'énergie renouvelable dans le cadre des réglementations.

4.3. Comportement des occupants

Aucun progrès significatif en matière d'efficacité énergétique ne pourra être fait sans mobilisation des citoyens en tant que consommateurs. Ainsi le rôle du consommateur se résume dans le choix des équipements, leurs gestions et enfin la maintenance, leur comportement et la façon dont ils utilisent les équipements ayant une influence déterminante sur la consommation d'énergie.

Conclusion

Dans ce chapitre on a essayé de ne pas mentionner l'ensemble des mesures existant pour l'amélioration d'efficacité énergétique des bâtiments car elles n'entrent pas dans le cadre de ce travail, d'un autre côté l'attention a été portée principalement sur les techniques d'efficacités énergétiques dites passives, cet impérative a été dicté par le souci de mettre en lumière des solutions qui vont être simulées dans la prochaine étape afin d'analyser leurs impact sur les besoins énergétiques du bâtiment.

Chapitre 2

La thermique du bâtiment et la simulation énergétique

Sommaire

Introduction.....	38
1. Conception architecturale et l'intégration des enjeux énergétique.....	38
2. Echange thermiques de bâtiment avec son environnement.....	39
2.1. Le transfert de chaleur.....	39
2.2. Les apports d'énergie dans le bâtiment.....	40
2.3. Perte de chaleur et gain de chaleur.....	41
2.4. Calculs de perte de chaleur dans les bâtiments.....	41
2.5. Le confort thermique.....	43
3. La simulation énergétique des bâtiments.....	43
3.1. Modélisation et/ou simulation.....	43
3.2. Le concept de simulation énergétique.....	43
3.3. Les atouts de la simulation énergétique.....	44
3.4. Le processus de simulation énergétique.....	45
3.5. Les sous-systèmes de la simulation énergétique.....	46
3.5.1. Processus météorologiques.....	47
3.5.2. Processus bâtiment (type de bâtiment)	47
3.5.3. Processus système climatisation, ventilation et chauffage.....	48
3.5.4. Processus occupation.....	48
3.5.5. Processus éclairage.....	49
3.5.6. Processus équipements électriques.....	49
3.6. Les outils de simulation.....	49
3.6.1. DOE2.....	50
3.6.3. EQUSET.....	50
3.6.5. Energy Plus.....	51
3.6.6. Design Builder.....	51
3.6.7. Open Studio.....	51
3.6.8. SIMEB.....	52
3.6.9. TRNSYS39.....	52
3.6.10. HAP.....	52
Conclusion.....	53

Introduction

Pour répondre aux exigences en termes de performances énergétiques d'un bâtiment et de contraintes imposées par la réglementation thermique et les différents labels, l'utilisation de la simulation est aujourd'hui indispensable. En effet, pour atteindre ces nouveaux seuils de performances, il est nécessaire d'évaluer l'intérêt de construire le bâtiment avec tel matériau plutôt qu'un autre, de voir quelle surface de vitrages doit être mise en place au sud pour minimiser les besoins de chauffage sans pour autant augmenter les besoins de climatisation... Ainsi, dans chaque projet de construction neuve ou de rénovation d'un bâtiment, la simulation permet de tester et dimensionner les différentes alternatives possibles afin de définir les solutions les plus adaptées.

La simulation est donc un outil d'aide à la conception incontournable en amont de la vérification réglementaire.

De plus, il s'attend à ce que cet outil soit applicable à tous les types de projets qu'il peut rencontrer (bâtiment collectif, maison individuelle, bureaux, en construction ou en rénovation...). Il peut aussi avoir des besoins au niveau de la diversité des calculs que cet outil doit pouvoir effectuer (besoins de chauffage, consommations énergétiques, confort d'été, intégration des énergies renouvelables, ventilation et qualité de l'air, évaluation des gains solaires utiles...). Pour répondre à cette variété des besoins, de nombreux outils de simulations ont été développés et présentés dans ce chapitre.

1. Conception architecturale et l'intégration des enjeux énergétiques

Intégration des enjeux énergétiques et environnementaux doivent être introduites tout au long du processus de projet architectural ; dès la phase de programmation jusqu'à la phase d'utilisation. Parmi ces étapes, la phase de la conception architecturale qui représente la phase fondamentale, puisque c'est au cours de cette dernière que sont mis en place les concepts (SEMAHI, 2013), les choix et les stratégies retenus dans le projet. Lorsqu'on approfondit dans le processus de conception architecturale, on a constaté que les phases amont (esquisse et avant-projet sommaire) sont des phases primordiales et décisives dans la conception. Pendant ces deux phases, les aspects généraux de dimension, orientation et construction du bâtiment sont définis.

En outre, toutes les décisions ultérieures et les calculs relatifs au projet seront basés sur ces caractéristiques. Donc, il est de plus en plus difficile et onéreux de modifier le projet au fur

et à mesure qu'il se développe. Les décisions prises dans ces étapes initiales auront un effet direct sur le comportement et la performance énergétique du bâtiment. Au cours des phases d'esquisse et d'avant-projet sommaire, le concepteur n'a pas accès aux diverses informations nécessaires pour faire ces choix adéquates entre plusieurs alternatives. Dans telle situation, le rôle des outils d'aide à la conception est révélé clairement, afin d'offrir des choix judicieux et des solutions adéquates relatives à l'efficacité énergétique et le confort thermique du bâtiment.

2. Echange thermiques de bâtiment avec son environnement

Parmi tous les éléments de construction offrant un potentiel de conception durable, ceux qui offrent le plus grand nombre de choix se trouvent dans l'enveloppe du bâtiment, son enveloppe extérieure. Pour concevoir des enveloppes de bâtiment écologiquement efficaces, il est essentiel de comprendre les mécanismes de transfert de chaleur.

2.1. Le transfert de chaleur

Transfert de chaleur fait référence au moment où l'énergie thermique passe entre des corps ayant des températures différentes. Il est une condition générale de la nature à rechercher l'équilibre, dans ce cas, l'équilibre thermique (Saint-Gobain, 2016). Lorsqu'il y a des différences dans la température se produit, ce processus de transfert ne peut pas être arrêté, seulement ralenti. Le transfert de chaleur dans les bâtiments est présenté dans la figure 2.1:

Dans le cas où l'un de ces trois modes est prépondérant, les effets des autres sont faibles et ils peuvent être négligés (ALAOUI, 2016). Le mécanisme d'apparition de chacun de ces modes est présenté brièvement ci-dessous :

La conduction : C'est la transmission d'énergie de proche en proche dans la partie solide d'un matériau. La chaleur se propage avec plus ou moins de facilité suivant la nature, les caractéristiques (résistances thermiques...) et la géométrie du matériau.

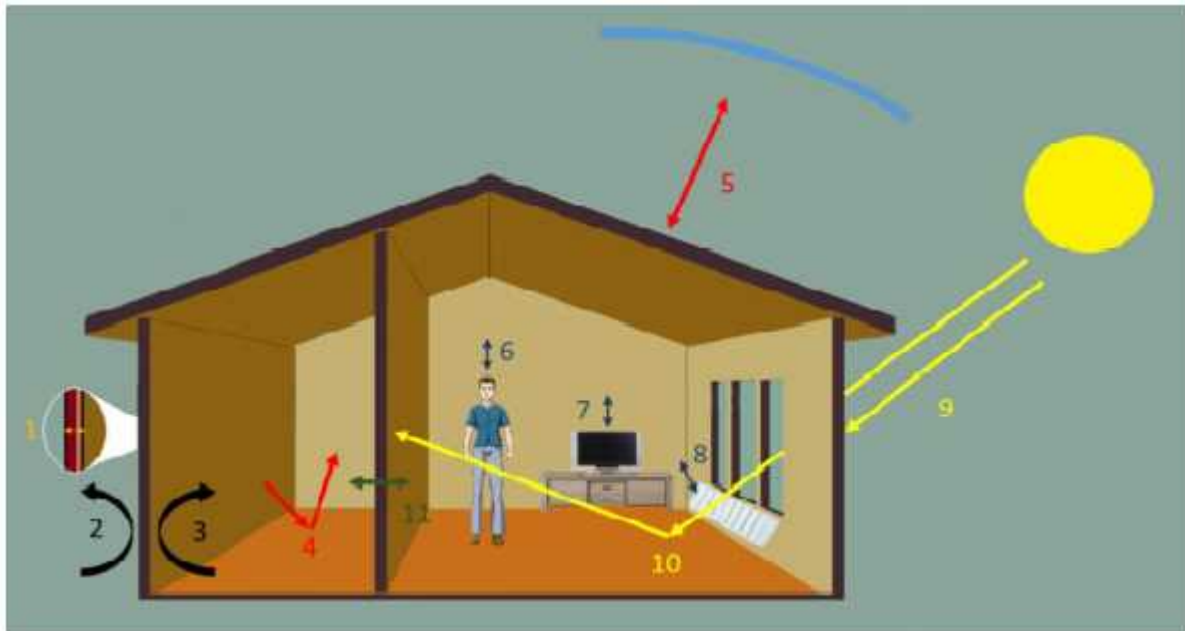
Plus le matériau est isolant moins il y a de conduction.

La convection : Ce mécanisme de transfert de chaleur est propre aux fluides (gaz ou liquide). Au contact d'un élément chaud le fluide, de l'air par exemple, se met en mouvement et se déplace vers l'élément froid au contact duquel il perd sa chaleur créant ainsi un mouvement vertical qui accélère les échanges thermiques entre les 2 éléments.

Plus l'air est immobile moins il y a de convection.

Le rayonnement : C'est le transfert de chaleur d'un élément à un autre par onde électromagnétique sans contact direct. Ce type de transfert ne nécessite pas de support matériel il peut se produire même dans le vide.

Plus l'émissivité du matériau est faible moins il y aura de transfert par rayonnement



N°	Description	N°	Description
1	Conduction	7	Echanges associés aux équipements (rayonnement, convection)
2	Echanges convectifs externes	8	Echanges associés aux systèmes de chauffage ventilation climatisation (rayonnement, convection)
3	Echanges convectifs internes	9	Echanges radiatifs CLO externes
4	Echanges radiatifs GLO internes	10	Echanges radiatifs CLO internes
5	Echanges radiatifs GLO externes	11	Echanges entre zones
6	Echanges de l'individu avec son environnement (convection, rayonnement, conduction)		

Figure 2.1 Echanges thermiques au sein d'un bâtiment et avec son environnement (BONTEMPS, 2015)

2.2. Les apports d'énergie dans le bâtiment

Apports intérieurs : le chauffage est une source importante des apports intérieurs, on prendra un soin tout particulier au rendement énergétique du système de chauffage. La respiration et le rayonnement humains, l'électroménager et le multimédia sont aussi des sources potentielles d'apport énergétique.

Apport extérieur : le rayonnement solaire est une source importante d'apport énergétique. Les choix de l'orientation et des menuiseries deviennent primordiales dans la dynamique énergétique.

2.3. Perte de chaleur et gain de chaleur

La compréhension technique de la perte et du gain de chaleur est une condition essentielle pour bien concevoir l'enveloppe du bâtiment. La chaleur circule naturellement dans des objets plus chauds aux objets plus froids via les processus de radiation, de convection et de conduction. Le rayonnement de la chaleur des objets prend la forme d'ondes électromagnétiques qui traversent l'espace. La plupart d'entre nous connaissons l'énergie rayonnante du soleil et ses effets sur l'enveloppe du bâtiment.

Un toit sombre et construit par un temps chaud et ensoleillé absorbera 70 à 90 % de l'énergie solaire et le rediffusera dans le bâtiment. Sans ventilation adéquate ni isolation du grenier, ce gain de chaleur peut ajouter 40 % à la charge de refroidissement du climatiseur. Par temps froid, dans un espace mal isolé ou près d'une fenêtre, la chaleur rayonne de notre corps vers l'espace plus froid, ce qui nous donne une sensation de froid.

2.4. Calculs de perte de chaleur dans les bâtiments

Un bâtiment gagne et perd de la chaleur à travers une variété de chemins. Pour que l'architecte puisse déterminer la performance d'un bâtiment en matière de conservation de l'énergie, il doit comprendre la nature et la magnitude de ces voies pour une conception donnée. Une bonne règle consiste à «isoler, puis à isoler» ou, en d'autres termes, à réduire vos gains et pertes de chaleur non désirés, puis à augmenter le gain solaire en fonction des besoins. La figure 2.2 montre les différentes voies de transfert de chaleur dans une maison typique entre l'intérieur et à l'extérieur.

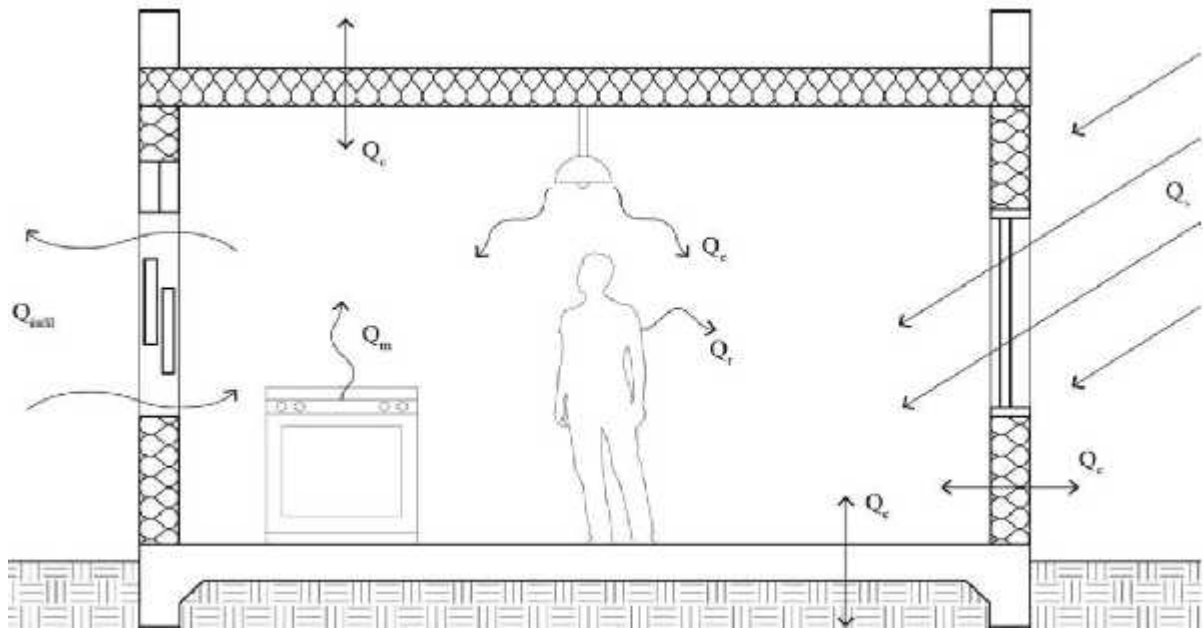


Figure 2.2 Les chemins de transfert de chaleur

(Source: Professor Stephen D. Dent, University of New Mexico, School of Architecture and Planning.)

Q_s = Gain de chaleur solaire

Q_c = flux de chaleur de conduction

Q_e = chaleur électrique (lumières, équipement)

Q_m = divers gains de chaleur (veilleuses, cuisinières à gaz, etc.)

Q_r = chaleur produite par les personnes

Q_{infil} = flux de chaleur de ventilation et d'infiltration

Le sens du flux de chaleur pour la conduction et la ventilation dépend des différences de température entre l'intérieur et l'extérieur. Un signe positif indique un flux de chaleur ou un gain de chaleur vers le bâtiment depuis l'extérieur plus chaud, tandis qu'un signe négatif indique un flux de chaleur ou une perte de chaleur du bâtiment vers la température ambiante plus froide à l'extérieur. Par conséquent, notez les changements de signe dans les formules présentées ci-dessous:

Hiver (cas typique où l'extérieur est plus froid que l'intérieur):

$$Q_{\text{total}} = + Q_s - Q_c + Q_e + Q_m + Q_r - Q_{infil}$$

Été (cas typique où l'extérieur est plus chaud que l'intérieur):

$$Q_{\text{total}} = + Q_s + Q_c + Q_e + Q_m + Q_r + Q_{infil}$$

2.5. Le confort thermique

Le confort thermique est un état d'équilibre entre le corps et son environnement mais la sensation de confort thermique est très subjective et dépend de l'individu (âge, sexe, situation géographique..) et de son activité (état de repos, sport, travail..). Il dépend de paramètres comme la température d'air et des surfaces environnantes, de la vitesse d'air, de l'humidité (Spitz, 2012). Cette notion étant propre à chaque individu et fonction de sa sensibilité, son niveau d'habillement, son taux d'activité et fait l'objet de nombreux projets de recherche portant sur le confort de l'occupant (Moujalled, 2007). Des études plus récentes ont porté sur l'approche adaptative du confort consistant à prendre en compte les interactions entre l'occupant et son environnement.

3. La simulation énergétique des bâtiments

3.1. Modélisation et/ou simulation

La modélisation énergétique des bâtiments a pour objectif d'élaborer des outils de représentation de la réalité en vue d'une observation des phénomènes de transferts d'énergie au sein d'un bâtiment, tels que (Blervaque, 2015) : la conduction au travers d'une paroi en une, deux ou trois dimensions, le rayonnement entre les parois ou avec l'extérieur (soleil, voûte céleste, albédo, etc.) les flux d'air entre zones d'un bâtiment, la production et la distribution de chaleur pour maintenir le bâtiment dans une plage de confort thermique.

La modélisation repose sur des postulats choisis par le développeur en fonction de l'objectif de l'étude et qui fixent les frontières du modèle.

La simulation est la résolution du modèle pouvant être réalisée sous différentes contraintes. Garnier (1995) a établi six niveaux d'abstraction en fonction de l'objectif de modélisation et de l'environnement de simulation : niveaux technique, physique, mathématique, algorithmique, numérique et informatique. Chaque niveau est contraint par les niveaux précédant et suivant, ce qui engendre une interaction forte entre un modèle (déterminé pour un objectif de modélisation précis) et sa simulation numérique (dans un environnement liant langage de programmation et méthode de résolution). Il en résulte un développement croissant d'outils de simulation pour le seul domaine de la simulation énergétique des bâtiments.

3.2. Le concept simulation énergétique

Une simulation (ou modélisation) énergétique d'un bâtiment est une analyse par ordinateur de la consommation d'énergie globale d'un bâtiment. Cela se fait généralement en utilisant un logiciel spécialisé qui permet d'entrer les données spécifiques du bâtiment à

modéliser, telles que la surface, la composition et l'orientation des murs, du toit et du plancher, le type d'occupation, les équipements, l'éclairage utilisé ainsi que les systèmes mécaniques. Ces données sont associées à un fichier météorologique choisi selon la position géographique du bâtiment et conçu pour les calculs énergétiques, puis le logiciel calcule la consommation d'énergie des équipements et systèmes électromécaniques du bâtiment pour la période étudiée.

En général, une simulation permet de comparer entre eux les effets de différentes mesures d'efficacité énergétique sur un bâtiment neuf ou existant. On peut ainsi comparer par exemple, les conséquences d'une meilleure isolation versus l'installation de systèmes mécaniques plus performants. Il sera donc possible d'évaluer les économies énergétiques à anticiper ainsi que la rentabilité d'une mesure donnée en tenant compte des effets croisés entre les différents systèmes électromécaniques du bâtiment.

3.3. Les atouts de la simulation énergétique

La modélisation est un outil de conception qui aide à la prise de décision lorsque diverses mesures d'efficacité énergétique sont envisagées et qui valide la conformité aux exigences de la réglementation. Ainsi, elle offre la possibilité de comparer, modifier et alterner les différentes options de configuration d'un projet en comparant les performances énergétiques avant de prendre des décisions d'investissement importantes. Cela permet donc de diriger le client dans ses choix et de visualiser l'incidence de ces derniers sur le projet global, qu'il s'agisse des matériaux, des systèmes ou encore de l'orientation du bâtiment.

La simulation offre la possibilité de comparer les différentes alternatives, leur faisabilité, leur pertinence et leur rentabilité à court ou à long terme. Elle aide aussi l'ingénieur à concevoir des systèmes adaptés aux besoins du bâtiment. (Favoino et al, 2018)

Aussi, la simulation aide à évaluer les effets du surdimensionnement des systèmes mécaniques en fonction des besoins internes du bâtiment afin d'éviter les équipements trop gros, ce qui pourrait engendrer des pertes économiques et énergétiques à long terme.

D'un point de vue économique, il est intéressant de savoir que certains programmes d'appuis financiers exigent une simulation énergétique du bâtiment neuf proposé (pour les nouvelles constructions) ou des modifications envisagées (pour les bâtiments rénovés) pour considérer les demandes. Le bâtiment de référence utilisé pour établir le montant de l'appui financier varie selon les exigences et règles de chaque programme. Il peut aussi être nécessaire

de réaliser la simulation sur différents logiciels pour chaque programme de certification ou d'appuis financiers.

3.4. Le processus de simulation énergétique

La modélisation sera effectuée d'après les plans et les détails du projet ainsi que les exigences applicables des programmes ou des normes applicables. Des guides de modélisation ont été développés pour guider le processus et établir les règles à suivre dans certains cas.

Pour effectuer une modélisation énergétique du bâtiment, plusieurs caractéristiques du projet sont à définir, tout en restant modifiables par la suite. Pour déterminer la consommation énergétique du bâtiment, le logiciel va simuler une année d'occupation en suivant les informations récupérées (figure 2.3).

- Une description géométrique du bâtiment par saisie de plans, où l'on spécifie les dimensions et orientations des pièces, parois, vitrages, ouvrants...
- Une description de l'environnement proche du bâtiment (bâtiments et végétation à proximité pouvant faire de l'ombrage, albédo du sol aux alentours...) ainsi que les données de localisation correspondantes (latitude, longitude et altitude).
- Une description de l'enveloppe du bâtiment, avec indication de la composition des parois, des vitrages, des portes... et des propriétés physiques (thermiques et optiques) des matériaux qui les constituent.
- Une description des équipements (chauffage, ventilation, eau chaude sanitaire, éclairage...) à travers les paramètres qui décrivent leur fonctionnement.
- Une description des sollicitations externes (données météorologiques) et internes (scénarios/données de ventilation, occupation...).

Les simulations doivent être dynamiques afin de pouvoir estimer aussi bien les consommations énergétiques que le confort des occupants en toute saison, qui est finalement l'une des premières performances requises pour un bâtiment. Ce travail de thèse porte donc sur des modèles et des codes de simulation dynamique du comportement thermique-énergétique des bâtiments.

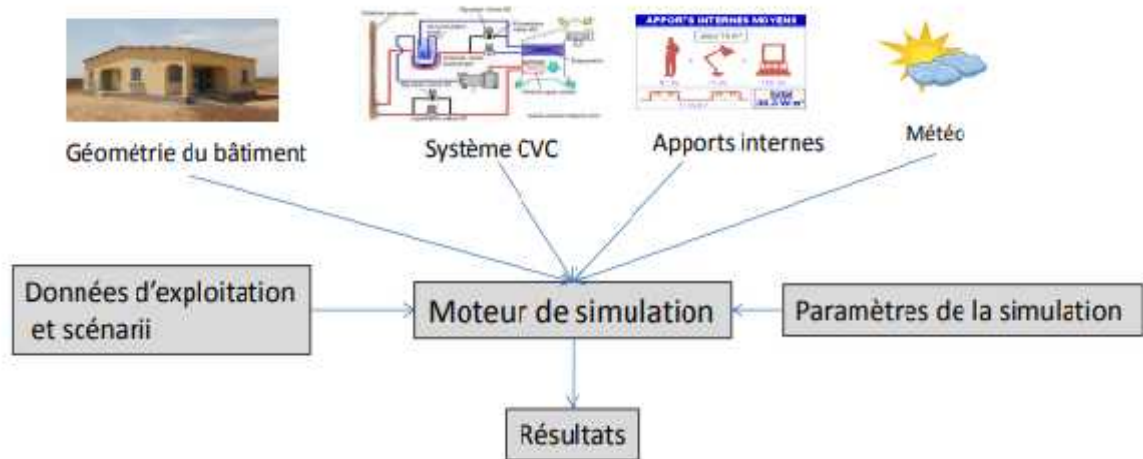


Figure 2.3 Illustration des données d'entrée pour les outils de simulation

3.5. Les sous-systèmes de la simulation énergétique

Concevoir des bâtiments durables exige de prendre en compte les divers processus dynamiques qui nous entourent afin d'obtenir des solutions robustes pour les bâtiments et les systèmes, capables de résister aux futures demandes. Conception des bâtiments on utilisant la simulation nécessite une approche intégrée des sous-systèmes (Hensen & Lamberts, 2011) qui les compose (figure 2.4).

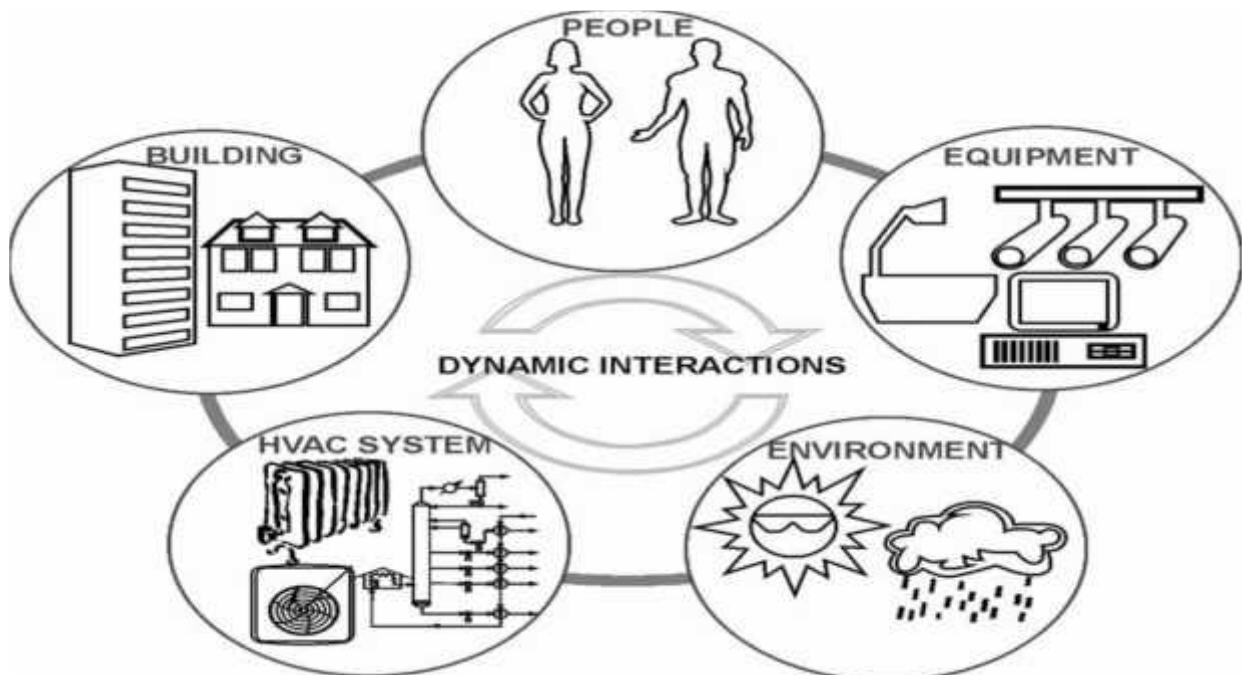


Figure 2.4 Interactions dynamiques de sous-systèmes (changeant continuellement) dans des bâtiments.

3.5.1. Processus météorologiques

Les données météorologiques se rapportent aux conditions de température, d'humidité et de rayonnement solaire du bâtiment. Ce terme est également utilisé pour désigner des informations sur l'emplacement géographique du bâtiment, la nature de l'heure locale et les propriétés du sol locales. Les données météorologiques ont un effet significatif sur les charges du bâtiment et le fonctionnement de l'équipement. Il joue donc un rôle clé dans les calculs de charge et de performance du système.

Les données météorologiques types visent à caractériser le climat typique pour une position géographique donnée. Ce format de données est particulièrement utilisé en phase de conception des bâtiments mais leur utilisation dépasse le cadre de la simulation énergétique des bâtiments (prévision de productions agricoles, de production électrique photovoltaïque, etc.). De nombreux formats de fichiers types ont été développés et la multiplicité des besoins dans différents domaines explique en partie cette diversité. Crawley (1998) et Hong et al, (2013) listent et proposent une étude comparée des formats existants. Ceux-ci incluent les fichiers TRY (Test Reference Year), DMY (Design Reference Year), WYEC (Weather Year for Energy Calculation), TMY (Typical Meteorological Year)

3.5.2. Processus bâtiment (type de bâtiment)

Un bâtiment est le conteneur contenant tous les systèmes CVC et non CVC pour un scénario de conception étudié dans une analyse énergétique. Pris à la lettre, un bâtiment représente une structure individuelle. Cependant, la définition d'un bâtiment est flexible. Il peut représenter une partie d'un bâtiment réel tel qu'une rénovation ou une addition. Il peut également représenter un groupe de structures. Par exemple, un bâtiment pourrait représenter un campus dans lequel toutes les structures sont desservies par un ensemble commun d'équipements de la centrale.

La forme du bâtiment, est utilisée pour définir les installations, les systèmes et les équipements non CVC inclus dans l'analyse énergétique. Il définit également les structures tarifaires des services publics utilisées pour calculer les coûts en énergie et en carburant.

Espaces

Un bâtiment est divisé en unités appelées "espaces" lors de l'analyse de son comportement thermique. Dans son sens le plus simple, un espace représente une seule pièce. Un espace est constitué d'un certain nombre d'éléments tels que des murs, des toits, des fenêtres

et des gains de chaleur internes qui influent sur le transfert de chaleur à l'intérieur et à l'extérieur de l'espace. De plus, un espace est desservi par un ou plusieurs systèmes de refroidissement et chauffage.

La définition d'un espace est en réalité flexible. Un espace ne doit pas toujours représenter une seule pièce. Dans certaines applications, il est plus approprié qu'un espace représente un groupe de pièces, un étage ou même un bâtiment entier.

Tous les espaces de la partie du bâtiment à analyser doivent être définis pour permettre d'effectuer des calculs de conception du système ou des simulations d'énergie.

3.5.3. Processus système climatisation, ventilation et chauffage

Les systèmes de refroidissement ou de chauffage assurent le besoin en mise en confort thermique de l'ambiance intérieure selon des critères fixés par les occupants. Ces systèmes énergétiques peuvent conduire à des consommations d'énergie exagérées dans les bâtiments si le contexte climatique n'est pas pris en compte.

Un système d'air est l'équipement et les commandes qui fournissent le refroidissement et le chauffage à une région d'un bâtiment. Un système d'air serve une ou plusieurs zones. La présence d'un thermostat dans chaque zone permet un contrôle spécifique de la température de l'air dans chaque zone. Les exemples de systèmes d'air comprennent les systèmes de traitement d'air des stations centrales, les unités de toit emballées, les unités verticales emballées, les systèmes fractionnés, les ventilo-convecteurs DX, les ventilo-convecteurs hydroniques et les thermopompes. Les composants d'un système pneumatique comprennent les ventilateurs et les serpentins, ainsi que les gaines, les bornes d'alimentation et les commandes associées. Lors de l'analyse énergétique, les composants de refroidissement DX, pompe à chaleur, chauffage par résistance électrique et chauffage par combustion sont considérés comme faisant partie du système d'air.

3.5.4. Processus occupation

Cet élément définit le nombre maximal de personnes présentes dans l'espace. L'occupation peut être entrée en termes de mètre carré par personne (m^2 / personne) ou de personnes totales.

Les gains totaux de chaleur des occupants pour un espace sont déterminés en multipliant le nombre d'occupants par les valeurs des gains de chaleur sensible et latente par personne. Les variations horaires et journalières de l'occupation sont définies via un horaire spécifié

séparément. Le gain de chaleur des personnes varie en fonction de l'activité exercée dans l'espace (Assis au repos, Bureau de travail, Travail sédentaire, Travail moyen, Travail lourd, Dansant, Athlétisme....

Le calendrier des personnes définit la façon dont l'occupation varie sur une base horaire et une base quotidienne.

3.5.5. Processus éclairage

Décrire les caractéristiques des appareils d'éclairage. Étant donné que les appareils d'éclairage génèrent des gains de chaleur par convection et par rayonnement, il faut connaître la puissance totale et le type d'appareil afin de calculer les charges d'éclairage. Le programme d'éclairage est utilisé pour décrire les variations horaires et journalières de l'utilisation de l'éclairage.

3.5.6. Processus équipements électriques

Permettre que le gain de chaleur provenant d'appareils ou d'équipements électriques dans l'espace soit modélisé. Les types d'équipement couramment modélisés de cette manière comprennent les photocopieurs, les ordinateurs de bureau, les imprimantes, les caisses enregistreuses, les équipements de cuisine et les machines d'usine. La puissance en watts définit la consommation maximale d'équipement, tandis que le calendrier décrit comment cette consommation varie chaque heure et chaque jour.

De plus, on doit décrire les gains de chaleur sensibles et latents provenant de diverses sources non électriques dans l'espace.

3.6. Les outils de simulation

Ces dernières décennies, centaines d'outils de simulation du comportement énergétique des bâtiments ont été développés à travers le monde. Le répertoire des outils élaboré par la Ministère de l'Énergie des États-Unis est là pour l'attester (Forgues, 2016): 398 outils liés à l'évaluation de l'efficacité énergétique, aux énergies renouvelables ou au développement durable des bâtiments y sont recensés. Les principaux objectifs de ces outils sont de proposer et justifier une disposition architecturale (Fabio et al, 2018), un type de matériau ou une stratégie de ventilation optimisant le confort et diminuant les consommations d'énergie.

Un grand nombre d'outils logiciels sont disponibles pour prédire les performances énergétiques et de confort des bâtiments. Chaque programme possède des caractéristiques

uniques en termes de résolution de modélisation, d'algorithmes de solution, public cible visé, options de modélisation, facilité d'utilisation par rapport à la flexibilité, etc.

Les outils de simulation dotés des capacités de modélisation les plus puissantes et ayant fait l'objet des études de validation les plus rigoureuses (par exemple, Energy Plus, DOE-2, TRNSYS) sont tous des logiciels existants (Crawley et al, 2008). Bien que ces outils disposent de communautés de développement actives et reçoivent des mises à jour régulières et des extensions des fonctionnalités de modélisation, leurs concepts sous-jacents et leur architecture logicielle de base ne changent pas.

Nous présentons ici une brève description des outils de simulation énergétique les plus souvent utilisés ainsi que leurs principales caractéristiques.

3.6.1. DOE2

DOE2 est un programme d'analyse de l'énergie de tout le bâtiment développé en 1993 qui calcule la performance énergétique et le coût global. La version actuelle est DOE-2.2e. Le programme prédit la consommation énergétique sur une base horaire à partir des données météo, de la géométrie du bâtiment, de la description des systèmes CVC et des tarifs d'énergie. La méthode des facteurs de transfert est utilisée pour déterminer le transfert de chaleur transitoire dans les murs alors que la méthode des facteurs de pondération est utilisée pour déterminer le comportement thermique des espaces du bâtiment.

3.6.2. EQUEST

EQUEST est une interface utilisant le moteur de simulation DOE2.2e. C'est un outil de simulation énergétique convivial qui permet une analyse de la performance de l'ensemble du bâtiment dans toutes les phases de conception. L'outil produit des résultats de qualité en intégrant un assistant de création de bâtiment, un module de mesures d'efficacité énergétique (MEE) et un module d'affichage graphique des résultats. Le module de création des bâtiments d'eQUEST simplifie et accélère le processus de simulation et permet aux utilisateurs de créer un modèle de bâtiment afin de faire une analyse détaillée des technologies de construction. La possibilité de modéliser plusieurs scénarios simultanément à l'aide du module d'assistance est l'un des avantages les plus remarquables d'eQUEST, puisqu'il permet de comparer graphiquement les résultats des différentes options.

L'outil permet aussi d'estimer les coûts de consommation énergétique, l'éclairage naturel, le contrôle de l'éclairage et la mise en œuvre automatique de mesures d'efficacité énergétique.

3.6.3. Energy Plus

Energy Plus, développé par le département de l'Énergie des États-Unis, est un moteur de simulation qui utilise un fichier texte pour les données d'entrée et les résultats de simulation. La charge du bâtiment est calculée à un pas de temps défini par l'utilisateur. Cette information est par la suite envoyée au module de simulation des systèmes du bâtiment.

Le module de simulation des systèmes d'Energy Plus calcule la charge de chauffage/refroidissement et la réponse du système. La méthode de calcul, qui est la méthode des bilans, permet une prédiction plus précise de la température de l'espace, du dimensionnement des équipements et du confort des occupants. De plus, l'outil permet d'évaluer des séquences de contrôle réalistes, l'humidité d'adsorption et de désorption des éléments de construction, les systèmes radiants de chauffage et de refroidissement, ainsi que le flux d'air interzone

3.6.4. Design Builder

Design Builder est une interface utilisant le moteur de simulation Energy-Plus qui permet de mener aisément à bien des analyses sur la consommation d'énergie, le confort intérieur et le dimensionnement des équipements CVC. Design-Builder offre la possibilité de simuler plusieurs types de systèmes CVC couramment utilisés.

De plus, les utilisateurs peuvent créer leur propre modèle de systèmes CVC et indiquer le niveau de détail à toutes les étapes du processus de conception.

3.6.5. Open Studio

Open Studio est un logiciel pour Google Sketch Up et Energy-Plus. Ce module d'extension permet aux utilisateurs de créer rapidement la géométrie d'un bâtiment et de choisir l'espace des attributs en utilisant la fonctionnalité intégrée dans Sketch Up. L'application d'Open Studio est un outil de modélisation énergétique graphique.

Il comprend la visualisation et l'édition de calendriers, l'édition des charges des constructions et des matériaux, une interface « glisser-déposer » pour affecter des ressources à des espaces et à des zones, un module de visualisation des systèmes CVC et un outil de conception des systèmes d'eau chaude sanitaire. Open Studio donne également accès aux données de la bibliothèque de composants de construction au modelleur.

3.6.6. SIMEB

SIMEB est un outil de simulation développé par Hydro-Québec qui analyse le comportement énergétique des bâtiments commerciaux et institutionnels. Cet outil permet à tous les membres de l'équipe de conception (concepteurs, professionnels du bâtiment, ingénieurs, techniciens, etc.) d'accompagner leurs clients dans l'utilisation de concepts intégrés pour les nouveaux bâtiments et de rénovations énergétiques pour les bâtiments existants. SIMEB offre plusieurs fonctionnalités, y compris un module qui permet la calibration de la simulation basée sur l'historique des factures énergétiques, un assistant rapide pour la modélisation d'un bâtiment et un module d'analyse des profils horaires. La fonction Archétype permet de générer rapidement un modèle de bâtiment en entrant un minimum de données à l'étape de l'esquisse.

SIMEB permet de définir les caractéristiques de construction telles que les aspects architecturaux, l'enveloppe thermique, les horaires d'occupation, la densité et le type d'éclairage, et les systèmes CVC pour analyser la consommation d'énergie. La plateforme de calcul peut être utilisée avec les moteurs de calcul DOE et Energy Plus

3.6.7. TRNSYS

TRNSYS est un outil flexible comprenant une interface graphique, un moteur de simulation, et une bibliothèque de composants qui inclut différentes compositions d'enveloppe et des équipements CVC standard et d'énergie renouvelable. La méthode des bilans est utilisée pour déterminer le transfert de chaleur. Cet outil de simulation permet le dimensionnement et l'analyse des systèmes CVC, la simulation des flux d'air multizones, la simulation de l'énergie électrique (Brun et al., 2010)., la conception solaire et l'analyse de la performance thermique des bâtiments et des systèmes de contrôle.

3.6.8. HAP

L'outil de conception HAP (Hourly Analysis Program) de l'entreprise Carrier comprend deux modules, un qui permet l'estimation de la charge et l'autre une analyse énergétique sur une base horaire. Les transferts de chaleur dans le bâtiment sont calculés par la méthode des facteurs de transfert de l'ASHRAE. Le module d'analyse de l'énergie fait une simulation heure par heure des charges et de l'opération des équipements pour une année complète.

Conclusion

La simulation est primordiale pour le développement et l'adaptation des bâtiments face aux enjeux énergétiques et aux changements climatiques.

L'intégration des outils de simulation énergétique dans le processus de conception comporte plusieurs avantages, mais aussi des limitations et des défis importants tels que l'absence de valeur par défaut, la variation du niveau de précision, la complexité des outils et l'interopérabilité entre les applications pour la saisie et le transfert des données. Le manque d'interopérabilité entre les logiciels limite l'échange de données entre les applications (tels que les outils de simulation et de modélisation CVC).

Ce problème peut avoir des conséquences sur le flux de travail et sur le processus de collaboration et de communication entre les intervenants des outils de simulation.

Chapitre 3

La consommation énergétique en Algérie, contexte et enjeux

Sommaire

Introduction.....	55
1. Situation énergétique dans le monde.....	55
1.1 Bilan mondial.....	55
1.2 Investissement mondiale et financement pour les bâtiments durables.....	57
1.3 Politique durable en construction des bâtiments.....	58
1.4 Codes énergétiques du bâtiment.....	58
2. Consommation énergétique en Algérie.....	60
2.1. La consommation énergétique par type d'énergie.....	60
2.2. La consommation énergétique par secteur.....	61
3. La politique énergétique en Algérie	62
3.1. Les textes réglementaires.....	62
3.2. Documents techniques réglementaire.....	63
3.3. Les dispositifs institutionnels de l'efficacité énergétique en Algérie.....	64
4. Programme national d'efficacité énergétique à l'horizon 2030.....	66
4.1. Secteurs d'intervention de programme.....	66
4.1.1. Pour le secteur du bâtiment.....	66
4.1.2. Pour le secteur des transports.....	67
4.1.3. Pour le secteur de l'industrie.....	67
4.2. Les axes d'interventions de programme.....	67
5. Les programmes nationaux pour la maîtrise d'énergie.....	69
6. Les coopérations internationales.....	70
6.1. Projet CES-MED.....	70
7. Les techniques de construction en Algérie.....	71
7.1. Les matériaux de construction.....	72
7.2. Les problèmes énergétiques liés à la production des bâtiments.....	72
Conclusion.....	74

Introduction

Parmi les réformes engagées dans le secteur énergétique, l'adaptation du cadre institutionnel de la maîtrise de l'énergie. La consommation énergétique de secteur de bâtiment a atteint 44 % de la consommation.

Dans les années 1990, l'Algérie a développé plusieurs dispositifs réglementaires quant à l'efficacité énergétique dans l'habitat. Suite à une réflexion sur la consommation des logements neufs initiée en 1995, le ministère de l'Habitat et de l'Urbanisme met en place des documents techniques réglementaires (DTR) en 1997. Ceux-ci déterminent notamment les valeurs de référence relatives aux déperditions et aux apports calorifiques concernant les bâtiments neufs à usage d'habitation et tertiaire. Un décret portant sur la réglementation thermique dans les bâtiments neufs en application la loi relative à la maîtrise de l'énergie adoptée le 28 juillet 1999.

La politique énergétique algérienne, repose aujourd'hui sur quatre axes : une agence nationale pour la promotion et la rationalisation de l'utilisation de l'énergie ; un cadre réglementaire assuré par la loi de 1999 ; un fonds national pour la maîtrise de l'énergie et des mesures d'incitations et d'accompagnement.

Dans ce chapitre, l'objectif est de savoir la situation énergétique du secteur bâtiment en Algérie par la présentation de la consommation d'énergie, la qualité des systèmes constructifs, la réglementation relative à la maîtrise de l'énergie et faire un descriptif des expériences existantes pour économiser la consommation énergétique en assurant le confort intérieur.

1. Situation énergétique dans le monde

1.1. Bilan mondial

Les tendances récentes en matière d'énergie et d'émissions de carbone liées à l'énergie pour le secteur mondial des bâtiments et de la construction sont variées, avec une consommation d'énergie croissante et une croissance limitée des émissions liées aux bâtiments. La construction et l'exploitation de bâtiments représentaient 36 % de la consommation d'énergie finale mondiale et 39 % des émissions de dioxyde de carbone (CO₂) liées à l'énergie en 2017 (Global ABC, 2018) (figure 3.1). Le secteur des bâtiments et de la construction représente donc la plus grande part de la consommation énergétique et des émissions, même en excluant l'énergie liée à la construction utilisée pour le transport de matériaux de construction sur les chantiers.

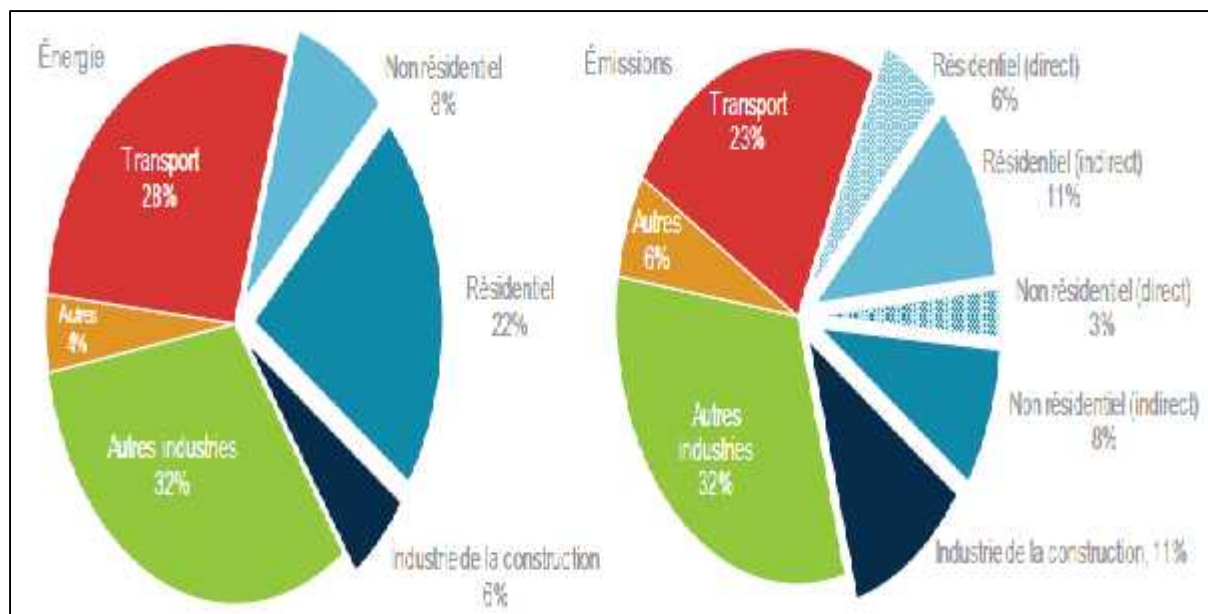


Figure 3.1 Part de la consommation d'énergie finale et d'émissions mondiales des bâtiments et de la construction, 2017

Sources: (IEA, 2018), World Energy Statistics and Balances 2018, www.iea.org/statistics et AIE Energy Technology Perspectives buildings model, www.iea.org/buildings.

La demande énergétique finale dans les bâtiments a augmenté de 5 % depuis 2010 ; l'impact de la croissance de la surface de plancher et de la population dépassant l'impact des améliorations en matière d'efficacité énergétique.

La croissance de la consommation électrique dans les bâtiments se conjugue avec celle des sources d'énergie renouvelables, dont la consommation a augmenté de 14 % entre 2010 et 2017. La consommation de gaz naturel a augmenté de près de 5 % au cours de cette période (figure 3.2), une partie de celle-ci ayant remplacé l'utilisation moins efficace de charbon, qui a chuté de près de 8 % au niveau mondial depuis 2010 (IEA, 2018). La consommation des autres types de combustibles, notamment le pétrole et la biomasse (l'utilisation traditionnelle), est restée stable au cours de la même période.

L'évolution de la consommation mondiale de combustibles dans les bâtiments est en partie due à l'évolution de la consommation finale, la croissance de la climatisation des locaux et des appareils électroménagers entraînant la croissance de la demande d'électricité dans les bâtiments. La consommation d'énergie pour le refroidissement des locaux a augmenté de plus de 20 % dans le monde entier entre 2010 et 2017, tandis que la demande d'électricité des appareils ménagers a augmenté de 18 % et que le chauffage des locaux a diminué d'environ 4 %. La réduction de la consommation d'énergie pour le chauffage des locaux, compte tenu de la

forte utilisation de combustibles fossiles pour la production de chaleur par rapport à d'autres utilisations finales, contribue également à la part la plus importante de la consommation d'électricité dans les bâtiments.

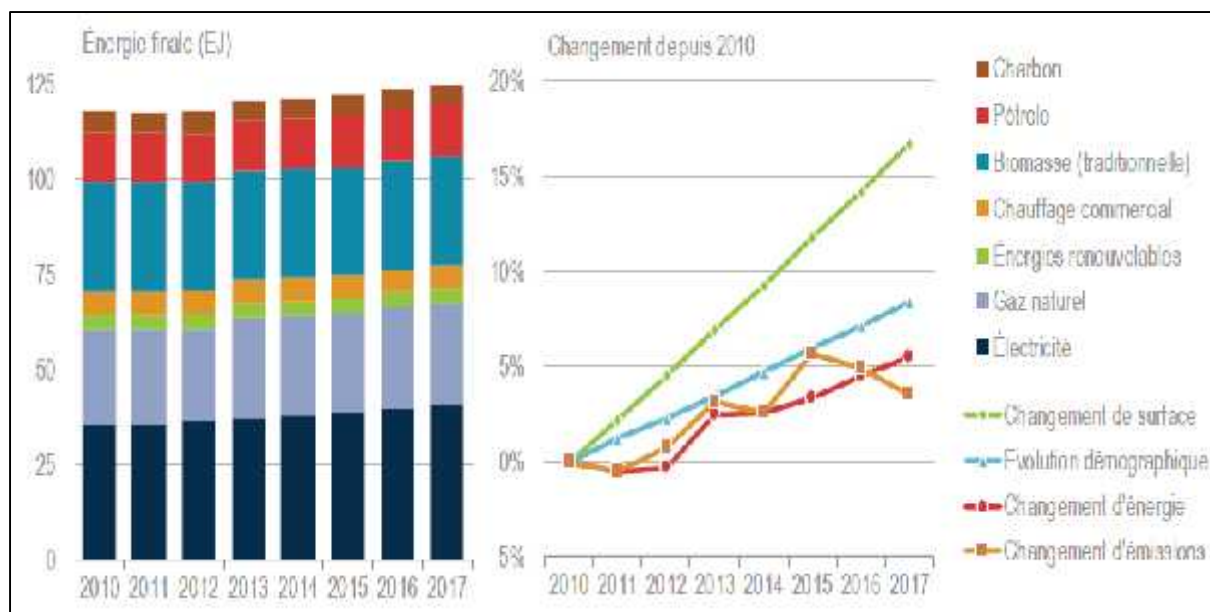


Figure 3.2 Consommation d'énergie finale par source d'énergie du secteur mondial des bâtiments, 2010-17 Sources: (IEA, 2018), World Energy Statistics and Balances 2018, www.iea.org/statistics et AIE Energy Technology Perspectives buildings model, www.iea.org/buildings

1.2. Investissement mondiale et financement pour les bâtiments durables

L'investissement supplémentaire dans l'efficacité énergétique dans les bâtiments, qui a augmenté de 4,7 % (l'augmentation de 3 % a été adaptée compte tenu de l'inflation), a atteint 140 milliards de dollars US en 2017 (Global ABC, 2018), constitue une mesure approfondie de l'investissement (figure 3.3). L'investissement supplémentaire dans les bâtiments neufs ou rénovés correspond à la variation du coût des services (conception, livraison et installation, par exemple) et des produits (éclairage, équipements et matériaux, par exemple) qui permet d'obtenir une efficacité énergétique supérieure à l'investissement requis pour la performance minimale autorisée légalement.

Pour les types de bâtiment et les produits non soumis à des exigences en matière d'efficacité énergétique, ce coût correspond aux dépenses supplémentaires consacrées aux services et produits éco-énergétiques au-delà de ce qui aurait autrement été dépensé (ce qui, dans certains cas, est nul). Pour l'investissement supplémentaire dans les bâtiments réalisé grâce à l'amélioration des politiques d'efficacité énergétique, ce coût correspond aux dépenses supplémentaires requises pour satisfaire aux nouvelles exigences de performance énergétique au-delà du niveau antérieur auquel le marché s'était déjà adapté.

Remarque : Le secteur résidentiel représente près des trois quarts de la consommation énergétique des bâtiments mais il ne représente que la moitié des investissements supplémentaires dans l'efficacité énergétique des bâtiments.

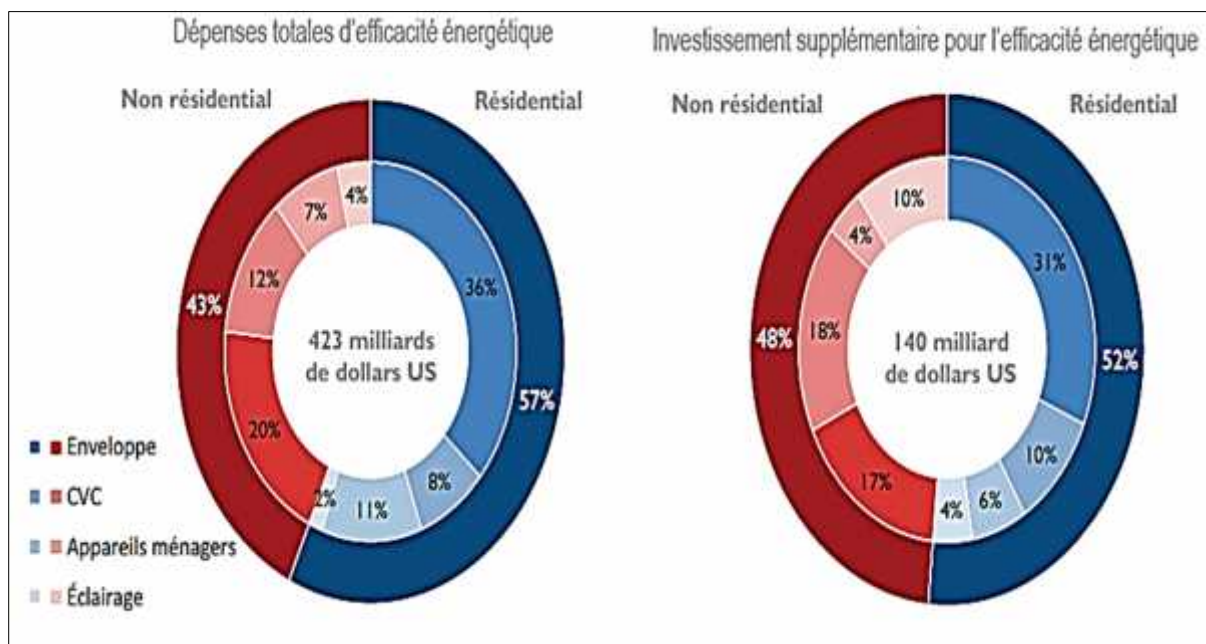


Figure 3.3 Investissement mondial dans l'efficacité énergétique des bâtiments, 2017

Source : (AIE, 2018), calculs établis à partir des données d'Energy Efficiency Investment Database, www.iea.org/buildings.

1.3. Politique durable en construction des bâtiments

La plupart des pays ont inclus le secteur des bâtiments et de la construction en tant que domaine permettant de réduire les émissions dans leurs contributions déterminées au niveau national (CDN). Beaucoup ont inclus l'efficacité énergétique, la commutation de combustible, la planification et la réglementation dans leurs stratégies de réduction des émissions. Les pays continuent également à mettre en œuvre et à mettre à jour les codes énergétiques des bâtiments et les politiques de certification, même s'ils ne sont pas explicitement mentionnés dans la CDN. Ils fournissent de solides exemples de politiques pouvant être mises en œuvre afin d'améliorer la durabilité des bâtiments et de la construction.

1.4. Codes énergétiques du bâtiment

Les codes ou normes énergétiques du bâtiment sont des exigences définies par une juridiction (nationale ou internationale) visant à réduire la consommation d'énergie pour un usage final dans le bâtiment. Le nombre de codes du bâtiment mis en œuvre a augmenté au cours des 10 dernières années. A l'heure actuelle, 69 pays ont mis en place des codes énergétiques du bâtiment volontaires ou obligatoires et 8 autres sont en train d'en élaborer (figure 3.4).

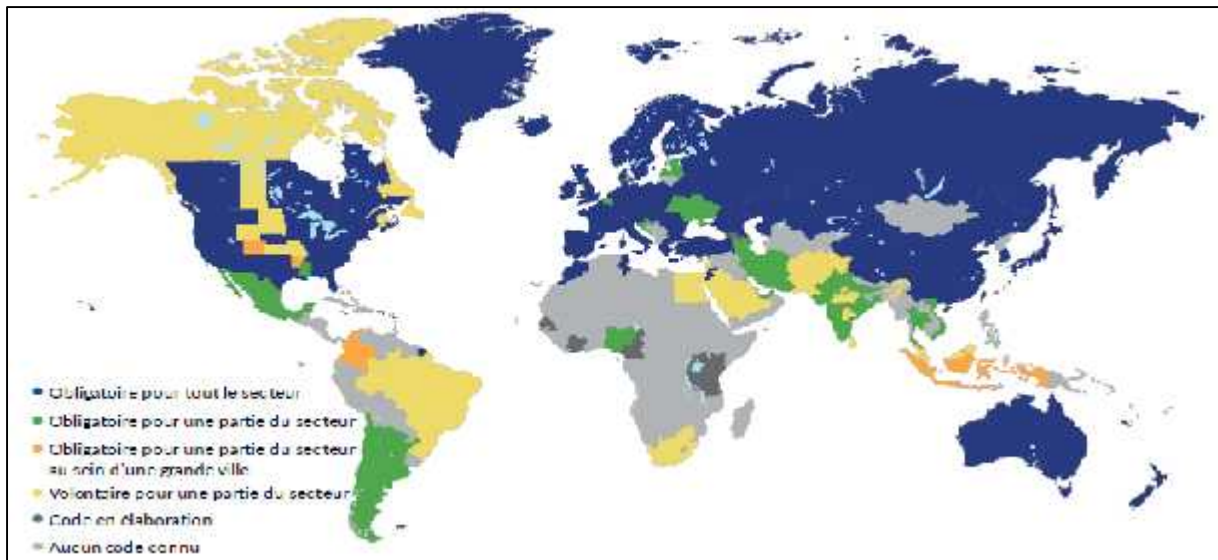


Figure 3.4 Code énergétique du bâtiment par juridiction, 2017-2018

Source : AIE (2018c), calculs établis à partir des données d'*Energy Efficiency Policies: Buildings*,

Union européenne

Un amendement (2018/844/UE) à la directive sur la performance énergétique des bâtiments (DPEB) a été publié le 19 juin 2018. Cet amendement introduit des révisions de la directive DPEB afin d'accélérer la rénovation des bâtiments existants. L'objectif est de créer un parc de bâtiments hautement éco-énergétiques et décarbonisé d'ici à 2050, permettant ainsi une transformation rentable en bâtiments à quasi zéro énergie. Les États membres ont jusqu'en mars 2020 pour transposer les dispositions en droit national (Commission européenne, 2018).

Japon

La loi sur l'amélioration de la performance énergétique des bâtiments (loi sur l'efficacité énergétique des bâtiments) est entrée en vigueur en 2017. La loi comprend des mesures réglementaires visant à assurer le respect obligatoire des normes d'efficacité énergétique pour les bâtiments non résidentiels de plus de 2 000 m². Elle exige également que les agences administratives soient informées des projets de construction, d'agrandissement et de rénovation de bâtiments d'une superficie de 300 m² ou plus (MLIT, 2018).

États-Unis

À compter de mai 2018, les normes d'efficacité énergétique des bâtiments en Californie version 2019 seront le premier code aux États-Unis à imposer l'utilisation de systèmes photovoltaïques solaires pour les nouvelles maisons. En outre, le code visait également l'efficacité énergétique, notamment une réduction de 30 % de la consommation d'énergie dans les bâtiments non résidentiels (CEC, 2018).

La Direction de la recherche et du développement de l'énergie de l'État de New York a mis au point une annexe volontaire au code (NYStretch Code - Energy) apportant des modifications aux derniers codes modèles nationaux (Code international de conservation de l'énergie de 2018 et ASHRAE 90.1 -2016) afin d'accroître l'efficacité et la durabilité des bâtiments. (NYSERDA, 2018). La ville de New York a également mis au point un manuel de révision du code de l'énergie, qui inclut les objectifs du code de 2019 et incorpore la dernière version du code NYStretch -Énergie, sur la base de la législation locale.

2. Consommation énergétique en Algérie

Selon le bilan du secteur pour 2018, la consommation finale est passée de 44,6 M Tep en 2017 à 48,1 M Tep en 2018, reflétant une hausse importante de 3,5 M Tep, soit (+7,8 %), tirée essentiellement par celle du gaz naturel, et un degré moins l'électricité, les GPL et les produits pétroliers.

2.1. La consommation énergétique par type d'énergie

L'évolution par produit est détaillée ci-après dans le tableau 3.1 (MEA, 2018 ; APRUE, 2015b)

Tableau 3.1 : La consommation finale par produits.

Produit	Unités	2017	2018	Evolution	
				Quantité	(%)
Produits pétroliers	K Tep	15 338	15 517	179	1,2
	K tonnes	14 664	14 843		
Gaz naturel	K Tep	13 655	16 024	2 369	17,4
	10 ⁶ m ³	14 449	16 956		
Electricité	K Tep	13 270	16 024	656	4,9
	GWh	56 376	58 153		
GPL	K Tep	2 335	2 588	253	10,8
	K tonnes	1 979	2 193		
Coke sidérurgique	K Tep	38	68	30	80,3
	K Tec	54	97		
Autres : Bois	K Tep	10	22	12	114,1
	K Tec	53	113		
Total	K Tep	44 646	48 146	3 500	7,8

Gaz naturel

Forte hausse (17,4 %) de la consommation de gaz naturel à 16,0 M Tep, induite par les besoins croissants des clients de Sonelgaz, notamment ceux des ménages, pour qui le nombre total d'abonnés a atteint 5,6 millions en 2018, soit près de 400 mille nouveaux clients ;

Electricité

Croissance de la consommation d'électricité (4,9 %) pour atteindre 13,9 M Tep, suite à la hausse de la demande des clients de Sonelgaz, notamment les ménages, dont le nombre total d'abonnés a dépassé 9,6 millions à fin 2018, contre 9,2 millions à fin 2017 (+4,6 %) ;

Produits pétroliers

Légère reprise (1,2 %) de la consommation des produits pétroliers à 15,5 M Tep, après deux années de baisse, tirée par celle du gasoil (3 %) et du GPL (42%) ; 20

GPL

Accroissement important de la demande sur les GPL (+11 %) à 2,6 M Tep, tirée par celle du GPL/C qui a connu une forte hausse (42 %),

2.2. La consommation énergétique par secteur

La consommation énergétique selon les différents secteurs est selon l'APRUE (APRUE, 2015b) et le ministère d'énergie. (MEA, 2018).

Par secteur d'activité, l'évolution de la consommation finale en 2018, fait ressortir ce qui suit:

Secteur des transports

Hausse (2,6 %) de la consommation du secteur des "transports" à 15,3 M Tep en 2018 comparativement à l'année précédente 2017, tirée par celle des carburants routiers ;

Secteur Industries et BTP

Hausse de la consommation du secteur "Industries et BTP" de 5,1%, passant à 10,5 M Tep, suite à la hausse de la consommation du sous-secteur ISMME (68 %), de la chimie (60 %) et des matériaux de construction (+6,6 %) ;

Secteur ménages et autres

Accroissement important de la consommation des "Ménages et autres" de 13,2 % à 22,4 M Tep, tirée par le sous-secteur résidentiel (17,6 %), essentiellement des besoins croissant en gaz induits par un hiver relativement rigoureux en 2018, combiné à la hausse du nombre des clients de Sonelgaz (notamment BP) ;

Le détail de la consommation finale par secteur d'activité, est donné le tableau 3.2 ci-après (MEA, 2018) :

Tableau 3.2 : La consommation finale par secteur.

Unité : k tep	2017	2018	Evolution	
			Quantité	(%)
Industrie et BTP, dont :	9 943	10 450	507	5,1
-Matériaux de construction	4 370	4 659	290	6,6
-ISMME	765	1 283	518	67,7
-BTP	441	486	45	10,3
-Industries manufacturières :	1 134	1 122	-13	-1,1
(Dont : agroalimentaires)	1 011	1 011	-	-
-Chimie	338	541	203	60,1
Autres industries	2 895	2 359	-537	-18,5
Transport, dont :	14 895	15 281	386	2,6
-Routier	14 138	14 342	204	1,4
-Aérien	496	608	112	22,6
Ménages et autres, dont	19 808	22 414	2 607	13,2
-Résidentiel	15 003	17 637	2 634	17,6
-Agriculture	440	362	-78	-17,7
Total	44 646	48 146	3 500	7,8

3. La politique énergétique en Algérie

En 1986, l'Algérie en tant que pays exportateur du pétrole et de gaz naturel était influencée par le contrechoc pétrolier. Les prix du pétrole ont baissé et provoquait une forte crise économique. (Mazari, M. 2012).

Pour affronter ce type des situations, l'État algérien prend conscience de l'importance d'une politique d'efficacité énergétique par la mise en route d'un certain nombre des lois règlementaires.

3.1. Les textes règlementaires

La réglementation thermique du bâtiment est une discipline de la thermique visant à étudier les besoins énergétiques des bâtiments. Elle aborde principalement les notions d'isolation thermique et de ventilation afin d'offrir le meilleur confort thermique aux occupants. Elle aborde aussi les problématiques de fourniture d'énergie pour le chauffage et de production d'eau chaude sanitaire. L'ensemble des parties d'un bâtiment est soumis aux transferts

thermiques, qui sont des échanges de chaleur entre le milieu chaud et le milieu froid (généralement de l'intérieur vers l'extérieur).

Les lois relatives à la maîtrise d'énergie sont :

La loi 09 - 99 du 28 juillet 1999 :

Elle est considérée comme une loi cadre relative à la maîtrise d'énergie, son rôle est d'assurer un des objectifs fondamentaux de la politique énergétique en Algérie. Par la gestion rationnelle de la demande d'énergie et fixe des nombreux aspects liés à la maîtrise d'énergie dans le domaine de la construction.

Le décret exécutif n° 2000-90 du 24 Avril 2000 :

Il porte la réglementation thermique dans les bâtiments neufs à usage d'habitation.

La loi 04 – 09 du 14 Août 2004 :

Elle est relative à la promotion des énergies renouvelables dans le cadre du développement durable.

Le décret exécutif 04- 149 du 19 Mai 2004 :

Il fixe les modalités d'élaboration du programme national de la maîtrise d'énergie.

Décret exécutif n° 05-16 du 11 janvier 2005 :

Il fixe les règles spécifiques d'efficacité énergétique applicables aux appareils fonctionnant à l'électricité, au gaz et aux produits pétroliers.

Arrêté interministériel du 29 Novembre 2008 :

Il définit la classification d'efficacité énergétique des appareils à usage domestique soumis aux règles spécifiques d'efficacité énergétique pour ceux qui fonctionnent à l'énergie électrique.

3.2. Documents techniques réglementaire

A partir de cette réglementation, le CNERIB (Centre National d'Etudes et de Recherches Intégrées du Bâtiment) a enrichi ce domaine par des documents techniques réglementaires. Ces DTR sont initiés par le ministère de l'habitat et mis en œuvre par le CNERIB (MH, 1997). Ils sont destinés aux bâtiments à usage d'habitation, spécifiquement à la nature d'enveloppe des constructions (Ferradji, 2017).

Le DTR. C 3 - 2 :

Il s'agit des règles du calcul des déperditions calorifiques pour les bâtiments à usage d'habitation.

Le but de ce DTR est de limiter la consommation énergétique pour le chauffage d'hiver par le calcul des déperditions thermiques et la vérification de la conformité d'un bâtiment (annexe 1).

Le DTR. C 3 – 4 :

Il s'agit d'un document qui prend en charge le calcul des apports calorifiques d'été pour les bâtiments à usages d'habitation. Il consiste à limiter l'utilisation de la climatisation pour rafraîchir en période d'été afin d'économiser la consommation énergétique.

Le DTR. C 3. 34 :

Il s'agit d'un document qui prend en charge la ventilation des locaux à usage d'habitation en donnant les principes généraux qu'il faut prendre en considération pour la conception des installations de la ventilation naturelle.

Tous ces réglementations ont l'objectif d'introduire la performance énergétique pour les constructions neuves ou lors de réhabilitation en minimisant les besoins calorifiques par 40 % selon l'APRUE.

Les bâtiments publics en Algérie, ne sont pas encore dotés, d'une réglementation thermique spécifique, l'application de la réglementation thermique détaillée dans les différents documents techniques réglementaires (DTR.C3-2, DTR.C 3-2 et DTR. C3-31) pour les bâtiments à usage d'habitation n'est pas obligatoire, c'est pour ces raisons que la quasi-totalité des bureaux d'études en architecture n'ont pas une copie de cette réglementation

Mais l'application de ces réglementations reste non obligatoire, la preuve est l'absence de toute efficacité énergétique dans les constructions sur le territoire Algérien.

3.3. Les dispositifs institutionnels de l'efficacité énergétique en Algérie

Les dispositifs institutionnels créés par l'état algérien sont destinés à assurer une mise en œuvre cohérente et une utilisation optimale des principaux instruments mis en place par la puissance publique en faveur de la maîtrise de l'énergie à savoir (Ferradji, 2017 ; Zekraoui, 2017 et Bouamama, 2013) :

1) Le programme national de maîtrise de l'énergie (PNME)

Le PNME est établi à partir des grandes orientations de la politique de développement économique et social du gouvernement ainsi que d'études de prospective énergétique à moyen et long termes permettant de définir les enjeux et les potentiels de la maîtrise de l'énergie pour chacun des secteurs d'activités économiques.

Le PNME définit les orientations, les objectifs et les principaux moyens de sa mise en œuvre. Il établit le cadre dans lequel vont se déployer les partenariats entre les acteurs économiques et sociaux ainsi que les opérateurs publics et privés.

2) Le fonds national pour la maîtrise de l'énergie (FNME)

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

3) Le comité intersectoriel de la maîtrise de l'énergie (CIME)

La clef du succès de ce dispositif est l'instauration d'une démarche systématique et permanente de partenariat entre les acteurs directs de la maîtrise de l'énergie. La création du "Comité intersectoriel de la maîtrise de l'énergie" réunissant les partenaires de la maîtrise de l'énergie permettra de faciliter la concertation avec et entre les partenaires et de faire de la maîtrise de l'énergie un domaine partagé. Le CIME est un organe consultatif placé auprès du ministre de l'énergie chargé d'organiser la concertation et le développement du partenariat public/privé. Il émet des avis sur :

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

Le CIME est composée :

- D'un représentant des ministères de l'intérieur, des finances, de l'énergie, de l'environnement, de l'industrie, de l'habitat et de l'urbanisme, des travaux publics, du transport, de l'agriculture, du commerce, des PME et PMI, des ressources en eau, de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique, de l'éducation nationale et des collectivités locales.

D'un représentant de la chambre nationale du commerce et de l'industrie,

- De quatre (4) chercheurs représentants des universités et écoles d'ingénieurs,
- D'un représentant de la SONATRACH,
- D'un représentant de la SONELGAZ,
- D'un représentant de l'autorité chargée de la planification,
- Le directeur général de l'APRUE,
- Des représentants des associations de la protection de l'environnement, de consommateurs, du club de la presse de l'énergie, des organismes de financement, des entreprises des secteurs de l'industrie et de l'énergie et de tout organisme susceptible d'apporter sa contribution à la maîtrise de l'énergie.

4) Agence nationale pour la promotion et la rationalisation de l'utilisation de l'énergie (APRUE)

La cheville ouvrière de l'élaboration du PNME est l'APRUE qui en assure également le suivi et l'évaluation pour le compte du Ministère chargé de l'énergie et sous son autorité.

Dans le cadre de la stratégie nationale de maîtrise de l'énergie, l'APRUE est en charge de l'animation de la politique nationale de maîtrise de l'énergie. Elle est de ce fait l'élément central du dispositif de mise en œuvre de ladite stratégie et doit en assurer le bon fonctionnement.

La politique de maîtrise de l'énergie œuvre dans le cadre d'une action de long terme en faveur de la rationalité économique et environnementale des choix énergétiques des différents secteurs d'activités de l'économie nationale.

La transversalité est un élément constitutif fondamental de la maîtrise de l'énergie et met ainsi en relief l'importance du rôle d'animateur en faveur de la promotion de réseaux d'acteurs qui incombe à l'APRUE.

4. Programme national d'efficacité énergétique à l'horizon 2030

Le programme d'efficacité énergétique à l'horizon 2030 s'intéresse à l'ensemble des secteurs de consommation qui ont un impact significatif sur la demande d'énergie : il s'agit du bâtiment, du transport et de l'industrie. Il vise globalement la réduction de la consommation de 9% à travers la substitution inter énergétique et l'introduction des équipements et des technologies performantes (APRUE, 2015a). Il a rappelé les objectifs du programme national d'efficacité énergétique qui se résume en quatre points : la réalisation de projets d'isolation thermique de logements, de réhabilitation thermique, l'installation de chauffe-eau solaires individuels et la diffusion de lampes LED pour les ménages et l'éclairage public

4.1. Secteurs d'intervention de programme

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

4.1.1. Pour le secteur du bâtiment

Le programme vise à encourager la mise en œuvre de pratiques et de technologies innovantes, autour de l'isolation thermique des constructions. Des mesures adéquates seront prévues au niveau de la phase de conception architecturale des logements.

Il s'agit également de favoriser la pénétration massive des équipements et appareils performants sur le marché local, notamment les chauffe-eau solaires et les lampes économiques : l'objectif étant d'améliorer le confort intérieur des logements en utilisant moins d'énergie.

La mise en place d'une industrie locale des isolants thermiques et des équipements et appareils performants (chauffe-eau solaires ; lampes économiques) constitue l'un des atouts pour le développement de l'efficacité énergétique dans ce secteur.

Globalement, c'est plus de 30 millions de TEP qui seront économisées, d'ici 2030.

4.1.2. Pour le secteur des transports

Le programme vise à promouvoir les carburants les plus disponibles et les moins polluants, en l'occurrence, le GPLc et le GNc : l'objectif étant d'enrichir la structure de l'offre des carburants et de contribuer à réduire la part du gasoil, en plus des retombées bénéfiques sur la santé et l'environnement. Ceci se traduirait par une économie, d'ici 2030, de plus de 15 millions de TEP.

4.1.3. Pour le secteur de l'industrie

Le programme vise à amener les industriels à plus de sobriété dans leurs consommations énergétiques. En effet, l'industrie représente un enjeu pour la maîtrise de l'énergie du fait que sa consommation énergétique est appelée à s'accroître à la faveur de la relance de ce secteur. Pour ce secteur, c'est plus de 34 millions de TEP qui seront économisées.

4.2. Les axes d'interventions de programme

1) L'isolation thermique des bâtiments

Le volet bâtiment du programme consiste en l'introduction et la diffusion des pratiques et des technologies innovantes autour de l'isolation thermique des constructions existantes et nouvelles. Pour ces dernières des mesures adéquates sont prévues au niveau de la phase de leur conception architecturale. L'objectif de ce programme à l'horizon 2030 (APRUE, 2015a) est d'atteindre un gain cumulé d'énergie de 7,6 millions de tonnes équivalent pétrole (MTEP).

2) Le développement du chauffe-eau solaire

Concernant l'usage (individuel et collectif) de l'eau chaude sanitaire, la priorité accordée par les pouvoirs publics, par ce programme, est la substitution du chauffage de l'eau par les moyens classiques par le chauffage solaire. A ce titre, des efforts considérables seront fournis, en vue de favoriser la pénétration massive des chauffe-eau solaires avec une attention particulière pour leur fabrication locale à l'horizon 2030,

3) La généralisation de l'utilisation des lampes à basse consommation d'énergie

L'objectif, à terme, des actions prévues dans le cadre de ce volet est la substitution de la totalité des lampes à incandescence par des lampes énergétiquement performantes. Pour ce faire, il est prévu, dans une première étape, l'arrêt de l'importation des lampes à incandescence, et l'interdiction de leur commercialisation, dans une deuxième étape. Les gains en énergie escomptés, à l'horizon 2030 avoisineraient 19,5 millions de TEP (APRUE, 2015a).

Par ailleurs, la production locale des lampes à basse consommation sera encouragée, notamment, par le recours au partenariat entre les producteurs locaux et étrangers.

4) L'introduction de la performance énergétique dans l'éclairage public

Le programme de maîtrise de l'énergie dédié aux collectivités locales consiste à substituer la totalité des lampes à mercure (énergivores et nocives) par des lampes plus efficaces (sodium haute pression).

Ce qui permettra d'atteindre une économie d'énergie d'un million de TEP, à l'horizon 2030 et d'alléger la facture énergétique des collectivités.

5) La promotion de l'efficacité énergétique dans le secteur industriel

Le programme vise à amener les industriels à plus de sobriété et de pondération dans leur consommation énergétique. En effet, l'industrie représente un enjeu pour la maîtrise de l'énergie du fait que sa consommation énergétique est appelée à croître à la faveur de la relance de ce secteur. A ce titre, l'objectif attendu en matière d'économie d'énergie est évalué à plus de 34 millions de TEP ; Pour plus d'efficacité énergétique, il est prévu :

- La généralisation des audits énergétiques et du contrôle des procédés industriels qui permettront d'identifier les gisements d'économie d'énergie substantiels et de préconiser des plans d'actions correctifs ;
- L'encouragement des opérations de réduction de la surconsommation des procédés industriels, à travers un soutien de l'Etat financier au financement de ces opérations.

6) La promotion du gaz de pétrole liquéfié carburant (GPL/c) et du gaz naturel carburant (GNc)

Le programme vise à promouvoir les carburants les plus disponibles et les moins polluants, en l'occurrence, le GPLc et le GNc.

L'objectif étant d'enrichir la structure de l'offre des carburants et de contribuer à atténuer les effets des carburants classiques sur la santé et l'environnement.

Ce programme prévoit, à terme, la généralisation de l'utilisation des carburants propres dans les transports individuels et collectifs, notamment, dans les grands centres urbains.

5. Les programmes nationaux pour la maîtrise d'énergie

Lors de la stratégie nationale de la maîtrise d'énergie, l'APRUE a lancé en 2009 six programmes de maîtrise et d'économiser l'énergie :

1) Programme Eco-Lumière

Il s'agit d'un programme qui a pour objectif d'assurer un éclairage performant par l'utilisation des lampes à basse consommation. Par la diffusion d'un million des lampes économiques dans les ménages sur le territoire national.

2) Programme Propp-Air

Il s'agit d'apporter un appui au développement du GPL Carburant pour diminuer l'impact de la pollution des transports dans les zones urbaines.

3) Programme Top-industrie

Il s'agit d'apporter une amélioration de la compétitivité avec une diminution des coûts de production en proposant une stratégie de maîtrise d'énergie.

4) Programme Alsol

Il s'agit de distribuer 1000 chauffe-eau solaire dans le secteur des ménages et 1000 autres dans le secteur du tertiaire. Il vise de mettre en place les conditions d'un marché durable du solaire thermique en Algérie. Ce programme consiste à trouver une collaboration entre l'APRUE et l'FNME

Ces programmes consistent à créer des économies de la consommation énergétique et minimiser L'émission du gaz à effet de serre.

5) Programme Eco-Bât

Ce programme a été lancé par l'APRUE et OPGI (Office Promotion Et Gestion Immobilier) afin de réaliser 600 logements de haute performance énergétique à travers le territoire national. Il consiste d'optimiser le confort thermique dans ces logements tous en minimisant la consommation énergétique liée au chauffage et de climatisation par environ 40 %. La localisation de ces logements est selon les zones climatiques dans 11 wilayas.

Il s'agit d'apporter un soutien technique aux maîtres d'ouvrage d'un côté et un aide financier par le Fonds National pour la maîtrise d'énergie par 80 % des surcoûts liés aux travaux d'installation des équipements de haute performance énergétique. (FNME).

L'objectif de cette opération est de sensibiliser les acteurs du secteur du bâtiment par l'importance de la problématique d'efficacité énergétique.

6) Isolation thermique de 1500 constructions existantes

Il s'agit de réhabiliter énergétiquement les constructions de type :

- Les bâtiments à usage d'habitation.
- Les bâtiments secteur tertiaire comme les hôtels, les établissements scolaires et les établissements sanitaires...etc.

L'objectif de ce programme est de réhabiliter 1500 constructions entre 2011 et 2013 afin de minimiser la consommation énergétique annuelle des logements entre 20 % et 40 %.

L'FNME prend en charge les coûts de ce projet pour encourager les propriétaires à des actions pareilles.

La réhabilitation est partielle en abordant :

- ☐ Les ouvrants extérieurs : par le remplacement des simples vitrages par le double vitrage.
- ☐ La toiture : par l'ajout des isolants thermique afin de minimiser les déperditions calorifiques vers le haut.

6. Les coopérations internationales

6.1. Projet CES-MED

Ce projet rentre dans le cadre des actions de coopération internationale initiées par le gouvernement algérien avec la commission européenne pour lequel l'APRUE a été désignée comme point focal.

Pour l'Algérie, le projet propose d'accompagner (03) communes retenues par le Ministère de l'Intérieur et des Collectivités Locales (Batna, Boumerdes et Sidi bel abbes) pour la mise en place de PAE (plans d'action énergétiques). Ces PAE ont pour objectifs de quantifier, sur des bases scientifiques et techniques reconnues internationalement, les économies en matière de consommation énergétique, (et donc en réduction d'émission carbone), que la municipalité pourra raisonnablement envisager par la mise en place de mesures techniques et organisationnelles appropriées.

Le projet vise également à accompagner la prise en compte de ces problématiques par les autorités nationales en favorisant la reproduction à terme des PAE dans d'autres APC, les trois (03) APC participantes étant vues comme des APC pilotes.

Les champs couverts par le projet sont au nombre de cinq (05) :

- ❖ L'efficacité énergétique des bâtiments ;
- ❖ L'éclairage public ;
- ❖ La gestion des déchets solides (émissions méthane),
- ❖ La production d'énergies alternatives,
- ❖ Les transports urbains et les implications énergétiques des politiques urbaines en générer.

Les objectifs du projet sont:

- ✓ D'une part de réduire la consommation énergétique et les émissions carbone au niveau de la municipalité et d'inscrire cette logique dans une vision du développement de la ville ;
- ✓ D'autre part, et par voie de conséquence, de réduire la part du budget municipal consacré aux postes énergétiques (exemple type : éclairage public).

7. Les techniques de construction en Algérie

La construction en Algérie est caractérisée par une uniformisation des systèmes constructifs pour répondre à un objectif de rapidité avec une facilité d'exécution (Chabane, 2010).

Il s'agit d'une ossature en béton armé composé par la jonction poteau-poutre avec un remplissage en briques creuses en terre cuite. Cette structure est composée par des semelles isolées sous poteaux, des poteaux, poutres et poutrelles en béton armé coulées sur place. Le coffrage utilisé pour le coulage du béton armé est en bois.

Les planchers sont composés par des poutrelles en béton armé, des hourdis en ciment préfabriqués ou en terre cuite et une couche de béton armé de 4 cm. Les escaliers sont en béton armé.

Ce système de construction est presque le même sur tous le territoire Algérien avec les mêmes matériaux de construction. Pour les grandes entreprises, c'est le système d'ossature en béton armé en murs porteurs avec des planchers pleins de 15 cm en béton armé. C'est un système peu utilisé, que pour la réalisation des grands ensembles.

Généralement, l'isolation thermique en Algérie représente un domaine ignoré lors de l'édification des constructions de tous types.

7.1. Les matériaux de construction

Les matériaux de construction sont presque standards suite à leur généralisation sur tout le territoire national. Les différents types présents sur les chantiers sont :

□ La brique :

Elle est en terre cuite ou en parpaing, c'est le matériau le plus utilisé pour le remplissage extérieur ou la séparation intérieure suite à la facilité de son utilisation dans la construction. La brique creuse en terre cuite est en deux types, la brique en 8 ou en 12 trous. Les murs extérieurs sont en double parois en briques creuses séparées par une lame d'air. La brique pleine reste inutilisable.

□ Le béton armé :

C'est un mélange du ciment, sable, gravier et de l'eau. Il est caractérisé par sa grande résistance mécanique. Son coulage est sur place dans le chantier par des planches en bois. Son utilisation est pour la structure, les planchers pleines, les escaliers, les linteaux...etc. (Hraoubia, 2011).

□ L'acier : Il s'agit des barres de 12m utilisés pour armer le béton. Sa production reste insuffisante en Algérie.

□ Le bois : Il est utilisé pour la menuiserie, les charpentes, le coffrage...etc.

□ Le verre : Il est utilisé pour les vitrages des ouvertures, c'est du simple vitrage dans la plus part des cas.

Le choix des systèmes et des matériaux de construction est selon la facilité de la mise en œuvre, la plasticité, la résistance mécanique...etc. Mais l'inconvénient majeur de ces systèmes est la faible résistance thermique. L'oubli de la contrainte du confort thermique va provoquer une surconsommation énergétique afin d'améliorer les ambiances intérieurs (Benoudjafer et *al.*, 2012).

7.2. Les problèmes énergétiques liés à la production des bâtiments

Les obstacles sont essentiellement d'ordre politique, économique et technologique. Ils sont dus à un manque de soutien politique au niveau national et un renforcement insuffisant des compétences pour mener les actions d'efficacité énergétique (Chabane, 2010).

La réalité sur le terrain montre de nombreuses lacunes concernant la maîtrise de l'énergie dans les bâtiments, notamment:

-) L'absence de moyens techniques et d'équipements pour la rationalisation de la consommation d'énergie, tels que l'utilisation d'ampoules basse consommation, ou le double vitrage qui, selon les experts, permettraient de réduire la consommation d'énergie de 30 % par rapport au simple vitrage;

-) Absence de mesures constructives et architecturales permettant de mieux contrôler la consommation des ressources énergétiques conventionnelles et de réduire l'impact des énergies fossiles sur l'environnement (emplacement et orientation, taille et emplacement des surfaces vitrées, volume et profondeur des locaux, composition des murs et choix des matériaux, isolation et inertie, ...);
-) Absence d'initiatives pour promouvoir l'utilisation d'énergies nouvelles et renouvelables, propres et durables;
-) Manque de motivation pour utiliser les énergies renouvelables.
-) Souvent, les pays en voie de développement s'inspirent des réglementations thermiques d'autres pays pour élaborer la leur. S'opère alors un calquage de pratiques de construction de pays tiers non adaptées au contexte local : c'est le cas de l'Algérie, la réglementation thermique est inspirée de l'ancienne réglementation de la France
-) Les fournisseurs d'équipements et matériaux de construction, qui sont ignorants des solutions énergétiques et des matériaux nécessaires à leur application (matériaux d'isolation, appareils électroménagers performants, etc.) (Bouamama, 2013).
-) En témoigne l'inefficacité du mécanisme de contrôle et de sanctions et par là même la non application de la réglementation thermique dans les bâtiments neufs. Pour répondre à la pénurie de logements, les critères de construction prioritaires sont la rapidité et le faible coût, et aucune réflexion sur la conception des bâtiments n'est engagée. C'est donc la hiérarchie des priorités qui ne s'est pas révélée favorable à l'application des dispositions prévues par la loi relative à la maîtrise de l'énergie.
-) Les prix de l'énergie subventionnés impliquent des temps de retour sur investissement souvent très longs et rendent les projets de politiques d'efficacité énergétique non profitables. Ainsi, en Algérie, la période de remboursement des projets d'isolation thermique est longue et n'incite pas les particuliers à améliorer la performance énergétique de leur habitat
-) Les entreprises de construction qui ne disposent pas d'une main d'œuvre qualifiée dans ce domaine et capable de réaliser les solutions techniques dans les règles de l'art. A titre d'exemple, les performances thermiques attendues de l'isolation des murs peuvent être totalement détruites par les ponts thermiques que les maçons peuvent laisser au moment des travaux de construction.

Conclusion

Dans le présent constat, l'Algérie ne fait pas exception à la situation mondiale en point de vue consommation énergétique et émissions des gaz à effet de serre (GES).

A cet égard, il apparaît bien que le secteur du bâtiment est l'un des acteurs majeurs de l'intégration du développement durable et présente un très fort potentiel d'amélioration d'efficacité énergétique.

Pour cela, nous consacrons le chapitre suivant en abordant une description de notre étude de cas sur un bâtiment tertiaire selon les réglementations thermique algériennes.

Chapitre 4

Présentation de la démarche et le cas d'étude

Sommaire

Partie 1 : Présentation de cas d'étude

Introduction.....	77
1. Démarche de conception et amélioration d'efficacité énergétique des bâtiments tertiaire.....	77
2. Description de cas d'étude.....	79
2.1. Pourquoi les bâtiments tertiaire ?.....	79
2.2. Caractéristiques du bureau standard.....	79
2.3. Ventilation et système de chauffage/rafraîchissement.....	82
2.4. Scénario d'occupation.....	82
2.5. Météorologie.....	84
3. Mesures d'efficacité énergétique proposée.....	84
4. Évaluation des mesures d'efficacité.....	88
5. Détermination des mesures d'efficacité optimale.....	88
6. Évaluation des mesures optimales.....	88
7. Présentation des outils de simulation.....	89
7.1. Hourly Analysis Program (HAP v 4.9).....	89
7.1.1. C'est quoi le HAP.....	89
7.1.2. Composition de HAP.....	89
7.1.3. Caractéristiques de conception du système HAP.....	89
7.1.4. Fonctionnalités d'analyse d'énergie HAP.....	89
7.1.5. Approches de saisie des alternatives par HAP.....	90
7.1.6. Analyse énergétique par HAP.....	91
7.2. Méteonorme.....	95

Partie 2 : Résultats et discussion

Introduction.....	97
1. Evaluation énergétique de bureau standard.....	97
1.1 Détermination des puissances de chauffage et de climatisation.....	97
1.2 Répartition de la consommation annuelle d'énergie.....	98
1.3 La consommation mensuelle de chauffage et de climatisation.....	99
1.4 Coûts d'énergie annuel.	100

1.5 Emission de gaz CO ₂	100
2. Evaluation des mesures d'efficacité énergétique proposées.....	101
2.1 Impacts de l'orientation.....	101
2.2 Impacts de l'isolation thermique de l'enveloppe.....	101
2.3 Impacts des vitrages et des protections solaires.....	103
2.4 Impact du confort thermique et du système CVC.....	105
3. Détermination des mesures optimales.....	107
4. Évaluation des mesures optimales.....	108
Conclusion.....	111

Partie 1 : Présentation de cas d'étude

Introduction

D'après les résultats présentés dans les trois chapitres sur les solutions d'amélioration énergétique, la simulation et présentation de la situation de la consommation algérienne. On arrive dans ce chapitre à présenter notre cas d'étude sur tous les volés en premier partie, pour que notre travail soit méthodique et objectif nous avons proposé une démarche qui nous facilite le processus de simulation. Un détail descriptif sur les caractéristiques des bureaux et la composition d'enveloppe a été fourni en basant sur la réglementation algérienne disponible, concernant les paramètres de la météorologie les informations nécessaires pour la simulation, ont été générées par logiciel météoNorme. Lorsque cette information conçue d'une manière appropriée, cela peut contribuer de manière significative à l'amélioration du confort intérieur, à la robustesse de la conception, à la réduction de la consommation d'énergie et à l'amélioration de la flexibilité énergétique des bâtiments.

1. Démarche de conception et amélioration d'efficacité énergétique des bâtiments tertiaire

L'approche de conception proposée a un double objectif. Le premier consiste à évaluer l'influence des mesures d'efficacité énergétique sur le besoin de chauffage et de refroidissement des bâtiments non résidentiels dans différentes zones climatiques en Algérie, afin d'obtenir les résultats de combinaison optimaux des performances énergétiques requises en termes de, consommation finale d'énergie, économies d'énergie et émissions de CO₂ pour chaque zone climatique. Le second est de fournir un outil d'aide à la décision permettant aux parties prenantes de sélectionner les mesures de rénovation les plus appropriées à leurs besoins.

L'approche développée s'applique également à la conception de nouveaux bâtiments et à la rénovation des bâtiments existant dans le cadre des audits énergétiques exigé par la réglementation algérienne. L'application est mise en œuvre sur un bâtiment tertiaire de type administratif. L'appellation de ce local est bureau standard (SB) dont les caractéristiques sont développées dans la section (4.3.2). L'approche est schématisée à la figure 4.1.

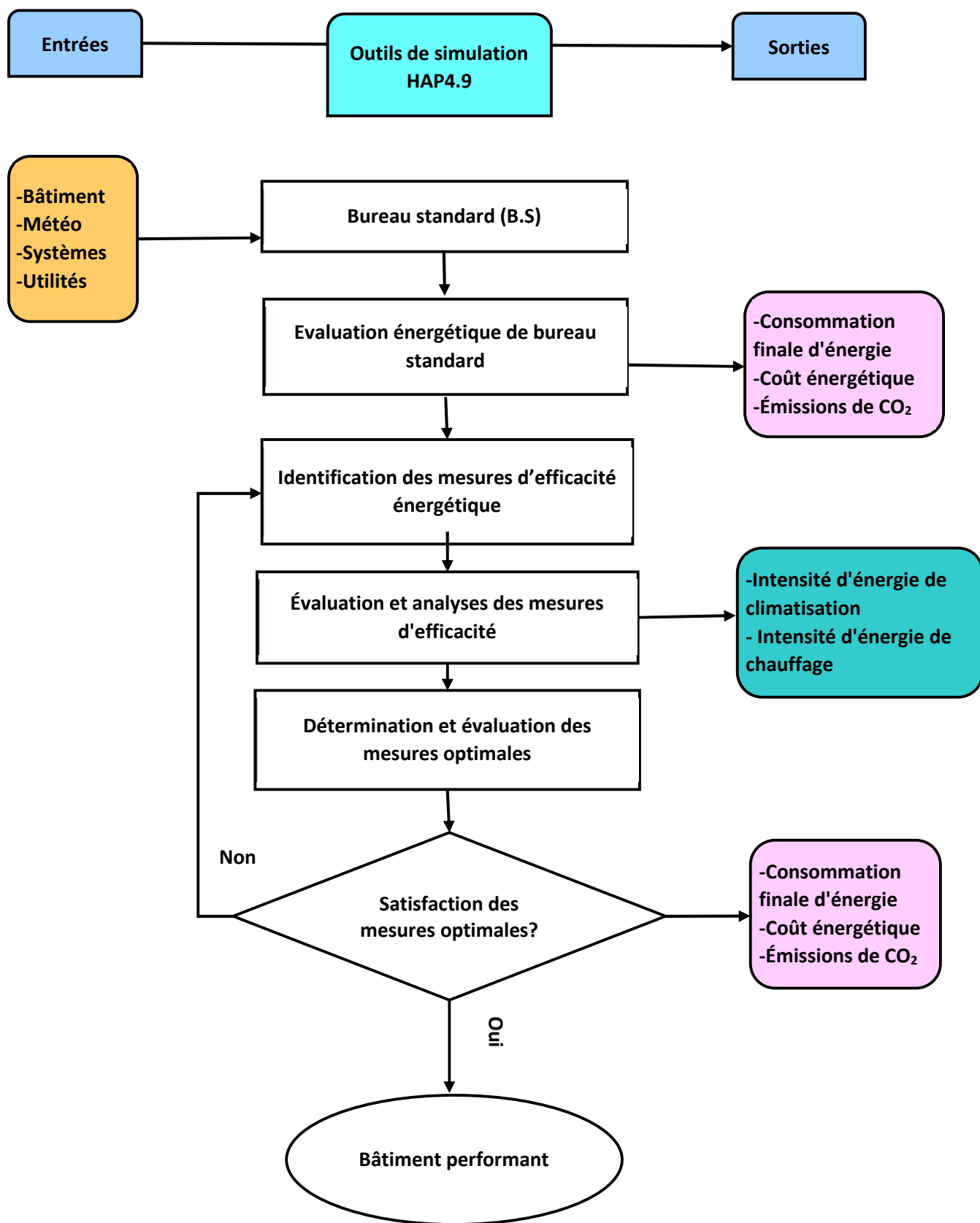


Figure 4.1 Approche de conception et amélioration d'efficacité énergétique des bâtiments tertiaire

2. Description de cas d'étude

2.1. Pourquoi les bâtiments tertiaires ?

Le bâtiment, notamment le secteur résidentiel, ont le plus grand impact sur la croissance de consommation énergétique. Dans l'avenir, il est prévu que la consommation d'énergie dans le secteur publique (tertiaire) est susceptible d'augmenter considérablement. Les bâtiments publics sont non seulement de gros consommateurs d'énergie, mais également contribuent énormément à l'émission de CO₂. Cependant, ces bâtiments offrent le plus grand potentiel pour la conservation d'énergie. Grâce à une conception informée du bâti, à une approche en énergie renouvelable (ex. technologies photovoltaïque et thermique) adaptée au contexte Algérien, une quantité considérable d'énergie non renouvelable peut être économisée.

Un bureau standard (BS) typique en Algérie est considéré pour cette étude. Sur la base de plusieurs analyses statistiques menées dans des études tel que (Imessad et *al.*, 2017; Derradji et *al.*, 2017; Khadraoui et *al.*, 2018; Khoukh et Fezzou, 2012). Il a été constaté que plus de 90% des immeubles de bureaux en Algérie ont les mêmes caractéristiques de base de l'enveloppe qui utilise des doubles couches de briques creuses sans isolation pour les murs, béton armé pour les toits et simple vitrage pour les fenêtres. En outre, les types de composants de construction utilisés et l'épaisseur des matériaux ont été obtenus à partir des normes de construction en Algérie (MH, 1997).

2.2. Caractéristiques du bureau standard

❖ La géométrie

D'une part, les établissements publics en Algérie tel que la Direction d'Urbanisme et de Construction (DUC) et la Direction de Logement et des Equipements publique (DLEP) ont mentionnés dans les cahiers de charge que les surfaces des bureaux sont variables entre 16-25m², de formes généralement rectangulaires, et avec hauteur conseillé 3,00-4,00m. D'autre part, des renseignements pris chez des architectes et des bureaux d'études concevant régulièrement des immeubles de bureaux, que les surface des bureaux sont de 16-30m² et hauteur de 3,50 m.

D'après cette analyse notre model sélectionné présenté dans la figure 4.2: un bureau rectangulaire avec les dimensions (L*H) (5*4) et une surface de 20 m². Avec deux fenêtres d'une surface totale est de l'ordre 4.5 m² qui représente 30 % de l'enveloppe. L'orientation pris comme référence pour cette étude est le sud.

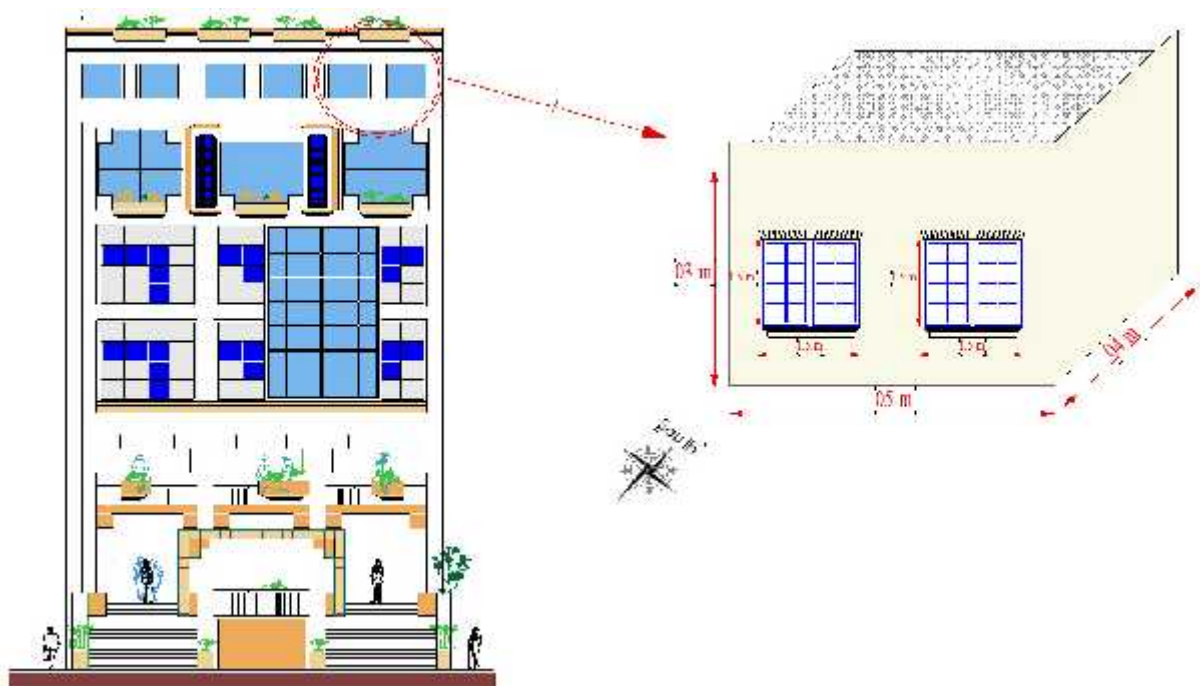


Figure 4.2 Les dimensions de bureau standard (S.B)

❖ Caractéristiques thermiques des matériaux utilisés

Le tableau 4.1 suivant présente les matériaux utilisés pour cette étude et leurs caractéristiques thermiques (les chiffres sont pris d'après les DTR et les fiches de constructeur).

Tableau 4.1 : Caractéristiques des matériaux utilisés (MH, 1997)

N	Matériau	Epaisseur m	Conductivité W/ (m. °K)	Densité kg/m ³	Chaleur Spécifique kJ / (kg - °K)	Résistance (m ² - °K)/W
1	Plâtre	0.02	0.35	800	1.34	0.06
2	Brique creuse	0.15	0.48	900	0.84	0.31
3	Brique creuse	0.1	0.48	900	0.84	0.21
4	Hourdi de 16	0.16	1.45	1450	1.09	0.11
5	Béton armé	0.1	1.18	2150	0.88	0.06
6	Ciment	0.02	1.15	1900	1.09	0.02
7	Gravie	0.01	0.36	1840	1.02	0.03
8	Carrelage	0.02	1.7	2200	0.93	0.01
9	Lame d'air	0.05	0.33	0	0	0.15
10	Isolant (polystyrène)	0.05	0.035	20	1.4	1.31

❖ Composition d'enveloppe

Le bureau est construit selon les normes de construction algérienne en vigueur, avec un système constructif courant (figure 4.3), une structure porteuse en béton armé, un plancher courant avec un corps creux et des murs en double cloison non isoler.



Figure 4.3 Le système de construction en Algérie.

La composition de l'enveloppe et les valeurs de transmission thermique U sont calculés par le logiciel de simulation HAP. Les résultats sont présentés dans le tableau 4.2 suivant :

Tableau 4.2 : Les caractéristiques et la composition de l'enveloppe

Enveloppe	Couches de matériau (de l'intérieur à l'extérieur)	Epaisseur matériel	Epaisseur total m	U value $W/m^2 \text{ } ^\circ K$
Mur extérieur	Plâtre	0.02	0.34	$U_{\text{Mur-E}} = 1,065$
	Brique creuse	0.1		
	Espace d'air	0.05		
	Brique creuse	0.15		
	Mortier	0.02		
Mur intérieur (Cloison)	Plâtre	0.02	0.14	$U_{\text{Mur-I}} = 1,95$
	Brique creuse	0.1		
	Plâtre	0.02		
Plafond	Plâtre	0.02	0.292	$U_{\text{Plafond}} = 1,895$
	Dalle creuse (hourdi 16)	0.16		
	Béton armé	0.1		
	Asphalte	0.002		
	Gravies	0.01		
Plancher	Plâtre	0.02	0.32	$U_{\text{Plancher}} = 2,026$
	Dalle creuse (hourdi 16)	0.16		
	Béton armé	0.1		
	Mortier	0.02		
	Carrelage	0.02		

❖ Caractéristique des fenêtres

D'après les études réalisées sur la fenestration en Algérie et les vitrages typiques locale disponible, les caractéristiques présentées dans le tableau 4.3 sont les plus utilisés.

Tableau 4.3 : Caractéristiques de fenêtre de base

Caractéristiques	Vitre	Epaisseur	Couleur	Cadre	U_{Window}	SHGC	Dimension	WWR
Fenêtre de base	Simple	5 mm	Neutre	Aluminium	6.195	0.949	1.5m*1.5m	30%

2.3. Système Chauffage, Ventilation et Climatisation

Le confort thermique est assuré dans cette zone d'étude par un générateur de puissance idéal (split air system), sa source d'énergie est l'électricité. Les coefficients de performance de système ont été établis suite à la charge de climatisation et de chauffage locale, sont égales à 3.224 pour le SEER « Seasonal Energy Efficiency Ratio » et 3.2 pour le SCOP « Seasonal coefficient of performance ». Ce système qui gère à la fois le chauffage (température de consigne de chauffage $T_C = 21^\circ\text{C}$) et la climatisation (température de consigne de rafraîchissement $T_R = 24^\circ\text{C}$). On considère un taux de renouvellement d'air de base égal à 0,5 vol/h.

2.4. Scénarios d'occupation

Le scénario d'occupation correspond à cette situation. Deux personnes occupent le bureau du 08h00 au 12h00 pour le matin et du 13h00 au 17h00 pour l'après-midi. On considère que l'occupation est de cinq jours par semaine du dimanche au jeudi. Le vendredi, samedi sont des jours de weekend et même les jours fériés.

De plus, un scénario d'utilisation des équipements est donné. Dans ce cas le bureau est doté par deux ordinateurs et une imprimante, les autres équipements auxiliaires ne sont pas pris en considération.

Les scénarios de fonctionnement sont présentés dans la figure 4.4 suivante :



Figure 4.4 Les scénarios d'occupation pour les personnes, équipements, chauffage climatisation, et éclairage

2.5. Météorologie

Le bâtiment est simulé dans trois climats algériens (Weather Base, 2017) représenté par trois villes : Alger, Batna et Ouargla illustré dans la figure 4.5. Dont les caractéristiques climatiques présentés dans les tableaux 4.4 et 4.5.



Figure 4.5 Présentation géographique des villes d'étude.

Tableau 4.4 : Caractéristiques des villes correspondant à cette étude.

Ville	Climats	Caractéristiques	Latitude / Longitude	Elévation (m)	Degré jour chauffage	Degré jour climatisation	Irradiation horizontale totale (kWh/m2/ an)
Alger	Méditerranée chaude	Hiver doux Été chaud	36.6°/3.2°	25	35	2989	1700
Batna	Semi-aride Froid	Hiver froid Été très chaud	35.6°/6.2°	1148	394	2492	1900
Ouargla	Désert très chaud	Hiver chaud Été très chaud et sec	31.9°/5.4°	150	21	5039	2650

Tableau 4.5 : Caractéristiques climatique des villes correspondant à cette étude.

Ville	Mois plus chaud	Mois plus froid	T max C	T min C	Précipitation moyen mm	Vent moyen m/s
Alger	8	1	38	-0.3	674	2.7
Batna	7	1	42.4	-6.3	371	3.6
Ouargla	7	1	48.6	-1.3	41	3.8

❖ La température

Le climat de *Batna* est un climat semi-aride caractérisé par un été chaud (moyenne des températures comprises entre 30 et 35°C) et un hiver froid (moyenne des températures comprises entre 0 et 5°C). Le climat d'*Alger* est un climat méditerranéen caractérisé par un été plutôt frais (moyenne des températures estivales entre 25 et 30°C) et un hiver doux (moyenne des températures entre 5 et 10°C). Le climat d'*Ouargla* est un climat désertique caractérisé par un été très chaud et sec (moyenne des températures comprises entre 35 et 40°C) et un hiver doux (moyenne des températures entre 5 et 10°C). Les température moyennes mensuelles des sites de cette étude présenté dans la figure 4.6. Les températures de base utilisée pour la simulation sont présentées dans l'**annexe 2**.

Les fichiers météorologiques utilisés pour les simulations sont des fichiers générés par logiciel METEONORM-7.

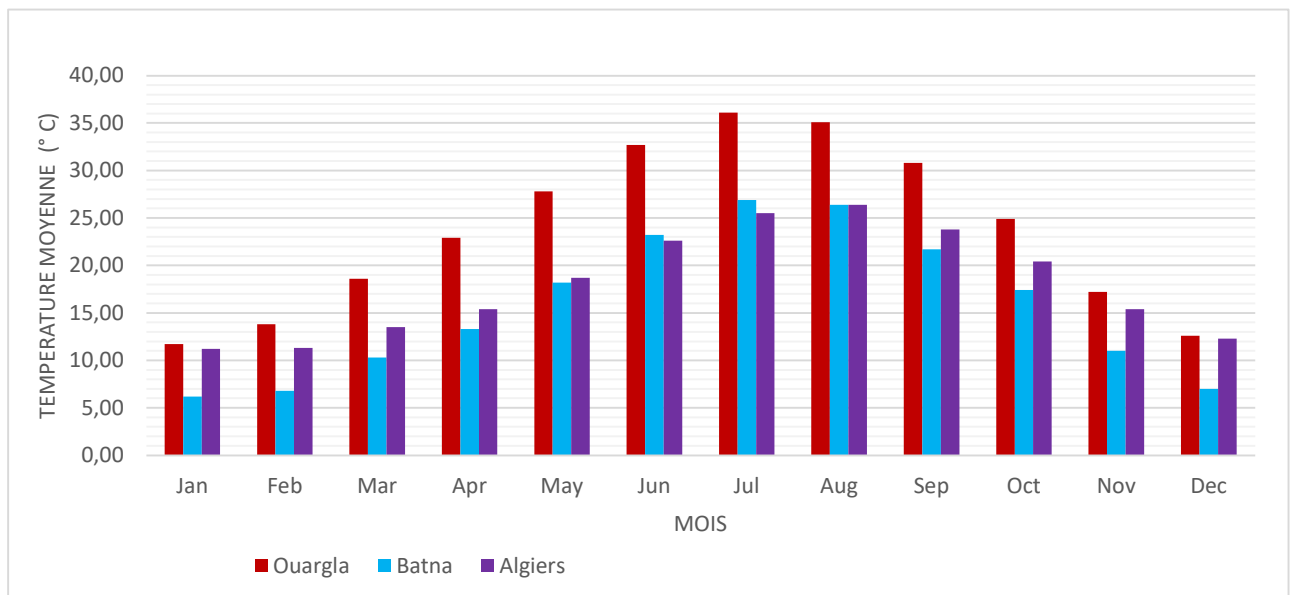


Figure 4.6 Température moyenne mensuel des villes (ASHRAE-meteo, 2018).

3. Les mesures d'efficacité énergétique proposées

Les mesures considérées pour cette étude (Eleni, Sotiris & Dionysia, 2015 ; Pyeongchan and Moncef, 2012; Fabrizio et al., 2015; Monica et al., 2017) sont: orientation du bâtiment, enveloppe du bâtiment (isolation thermique, caractéristiques du vitrage, ombrage (protection solaire), etc.) et système de CVC (type, point de consigne, etc.). Ces mesures sont sélectionnées en tenant compte de la réglementation algérienne en vigueur et standard international. Ainsi, l'effet d'éclairage n'est pas inclus. Le tableau 4.6 répertorie les mesures mises en œuvre. Une brève discussion sur les options associées à chaque mesure est fournie ci-après :

Mesures 1 : Orientation de bâtiments :

L'orientation est définie par l'angle d'azimut. On considère que quatre options d'orientation varient de 0 ° (sud) à 90 ° (ouest), 270 ° (nord) et 360 ° (est).

Mesures 2 : Isolation thermique de l'enveloppe :

L'isolation des murs extérieurs et du toit est définie par l'épaisseur de l'isolant. Quatre épaisseurs différentes sont considérées de l'isolant, qui sont 0,025m, 0,05m, 0,075m et 0,1 m. Pour simplifier les calculs, le même matériau isolant « polystyrène expansé » est proposé dans tous le cas, avec une conductivité thermique de 0,035 W / (m² K). Pour la réflectance de la chaleur solaire du toit, trois options sont prises : claire, moyenne et sombre.

Mesure 3 : Vitrage et protection solaire :

Le type de vitrage est caractérisé par le nombre de vitres et le type de revêtement (à faible émissivité / réfléchissant) appliqué sur les surfaces de vitrage. La valeur U et le coefficient de gain de chaleur solaire (SHGC) sont deux paramètres qui définissent l'efficacité de la fenêtre. Cinq types de vitrages typiques avec différentes propriétés sont sélectionnés dans cette mesure. Pour la protection solaire, deux types sont inclus : mobile (interne) avec les stores vénitiens et la protection fixe (externe) avec porte-à-faux dont différente profondeur étudiée.

Mesure 4 : Température de consigne (climatisation / chauffage) :

Le réglage de la température de climatisation / chauffage est défini par la température intérieure maximale acceptable, nécessaire pour maintenir le confort thermique. Quatre plages de températures de chauffage en hiver ont été traitées qui varient entre (20 ° C et 23 ° C) et cinq plages de températures de climatisation ont été comprises qui varient entre (21 ° C et 26 ° C).

Mesure 5 : Efficacité énergétique des systèmes de CVC :

L'efficacité des systèmes de chauffage et de climatisation est définie par deux codes, SEER pour la climatisation et SCOP pour le chauffage. En fait, le SEER est classé entre 3 et 5 parmi les systèmes de climatisation les plus utilisés au monde. Ces codes facilitent la comparaison des performances énergétiques de différents systèmes. Par conséquent, trois cas sont pris en compte : standard, élevé et premium.

Tableau 4.6 : Les mesures d'efficacité énergétiques proposées.

	Mesures d'efficacité	Symbole	Valeur	Unités	Bureau standard (BS)
1	Orientation bâtiment	OB	90°	°	0° sud
			180°		
			360°		
2	Isolation thermique du plafond (Polystyrène expansée)	P_{Ith}	0	m	Pas d'isolation
			0,025		
			0,05		
			0,075		
			0,1		
	Réflectance de la chaleur du plafond	P_{Rc}	0,45		0,675
			0,675		
			0,900		
	Isolation thermique de mur (Polystyrène)	M_{Ith}	0	m	Pas d'isolation
			0,025		
			0,05		
			0,075		
			0,1		
3	Vitrage de la fenêtre	V_f	Simple neutre 5mm	$U_{Window} = 6,195$	Simple vitrage
				$SHGC = 0,949$	
			Double neutre 6/13/6mm	$U_{Window} = 2,772$	
				$SHGC = 0,838$	
			Double faible émissivité 6/13/6mm	$U_{Window} = 1,995$	
				$SHGC = 0,708$	
	Protection solaire interne mobile	P_{Sm}	Double réfléchive 6/13/6 mm	$U_{Window} = 2,772$	Pas de protection
				$SHGC = 0,372$	
			Double faible émissivité / réfléchive 6/13/6 mm	$U_{Window} = 1,995$	
				$SHGC = 0,465$	
			Ventiane store	$U_{Window} = 4,676$	
				$SHGC = 0,658$	
4	Protection solaire externe fixe « Over Hang »	P_{Sf}	0	m	Pas de protection
			0,1		
			0,2		
			0,3		
			0,4		
			0,5		
	Points de confort de climatisation	C_{cl}	21	°C	24°C
			23		
			24		
			25		
			26		
	Points de confort de chauffage	C_c	20	°C	21°C
			21		
			22		
			23		
5	Système CVC	S_{CVC}	SEER 3,224/ SCOP 3,2 standard	/	SEER 3,224 SCOP 3,2
			SEER 4,224/ SCOP 4,2 high		
			SEER 5,224/ SCOP 5,2 premium		

4. Évaluation des mesures d'efficacité

Dans cette section, une simulation réalisée pour évaluer les mesures d'efficacité examinées afin de déterminer l'impact de chaque ensemble de mesures sur les trois zones climatiques en Algérie. Deux indicateurs de consommation d'énergie sont utilisés, le premier est l'intensité énergétique de climatisation par mètre carré et le second est l'intensité énergétique de chauffage par mètre carré (Chadi et *al.*, 2018; Navid et *al.*, 2018; Pyeongchan and Moncef, 2012; Fatemeh et *al.*, 2017). En conséquence, la consommation d'énergie d'une mesure d'efficacité est comparée à la consommation d'énergie d'un bureau standard.

5. Détermination des mesures d'efficacité optimale

Sur la base des résultats obtenus dans la section précédente, une classification est élaborée en fonction des économies d'énergie de chauffage et de climatisation afin de comparer les mesures de rendement pour les différentes zones climatiques et de déterminer les mesures de rendement optimales. Par conséquent, Excel est l'application appropriée pour cette section afin de représenter les résultats graphiquement.

6. Évaluation des mesures optimales

Les résultats des impacts mesures optimaux sont obtenus indépendamment. En outre, une combinaison de ces mesures est utilisée pour évaluer la conception de la performance énergétique des bâtiments pour chaque zone climatique. Trois indicateurs sont pris en compte : la consommation finale d'énergie, le coût énergétique et les émissions de CO₂.

Premièrement, la consommation finale d'énergie comprend tous les types de charges énergétiques, de climatisation, de chauffage, de ventilation, d'éclairage et d'équipements.

Ensuite, les coûts énergétiques sont calculés en utilisant le tarif effectif des services publics qui contient des informations de base, telles que les unités de mesure, le prix forfaitaire, les frais clients, la planification et le taux de taxe. Pour l'étude de cas, le coût en électricité du bâtiment non résidentiel était de 5,4796 DA / kWh, qui a été utilisé comme prix forfaitaire.

Enfin, les émissions de CO₂ sont calculées à l'aide des facteurs de conversion. Comme le chauffage, la climatisation, l'éclairage et les équipements de bureau sont tous alimentés par l'électricité ; le même facteur est appliqué pour tous ces services. Par la suite, le facteur d'émission de CO₂ pour l'électricité en Algérie est de 0,61 kg éq.CO₂ / kWh.

7. Présentation des outils de simulation

Deux outils ont été utilisés dans notre étude.

7.1. Hourly Analysis Program (HAP v 4.9)

7.1.1. C'est quoi le HAP

HAP est un outil informatique qui assiste les ingénieurs dans la conception de systèmes CVC pour les bâtiments commerciaux. HAP est deux outils en un. Il s'agit d'abord d'un outil d'estimation des charges et de conception de systèmes. Deuxièmement, il s'agit d'un outil permettant de simuler la consommation d'énergie et de calculer les coûts énergétiques. À ce titre, il est utile pour la certification LEED®, la conception schématique et les évaluations détaillées des coûts énergétiques de la conception. HAP utilise la méthode de la fonction de transfert approuvée par ASHRAE pour les calculs de charge et des techniques de simulation d'énergie détaillées 8 760 heures par heure pour l'analyse énergétique (Carrier, 2014).

7.1.2. Composition de HAP

Ce programme est publié sous la forme de deux produits similaires, mais distincts. Le programme « HAP System Design Load » fournit la conception du système et les fonctionnalités d'estimation de la charge. Le programme complet « HAP » offre les mêmes capacités de conception de système, ainsi que des fonctionnalités d'analyse énergétique.

7.1.3. Caractéristiques de conception du système HAP

HAP estime la charge de climatisation et de chauffage des bâtiments commerciaux afin de déterminer les tailles requises pour les composants du système de CVC. En fin de compte, le programme fournit les informations nécessaires à la sélection et à la spécification des équipements. Plus précisément, le programme effectue les tâches suivantes :

- Calcule les charges de climatisation et de chauffage nominales pour les espaces, les zones et les bobines dans le système CVC.
- Détermine les débits d'air requis pour les espaces, les zones et le système.
- Taille des serpentins de climatisation et de chauffage.
- Taille des ventilateurs de circulation d'air.
- Taille des refroidisseurs et des chaudières.

7.1.4. Fonctionnalités d'analyse d'énergie HAP

HAP estime la consommation d'énergie annuelle et les coûts énergétiques des systèmes consommateurs de CVC et des systèmes non consommateurs de CVC dans un bâtiment en

simulant le fonctionnement du bâtiment pour chacune des 8 760 heures d'une année. Les résultats de l'analyse énergétique servent à comparer la consommation d'énergie et les coûts énergétiques de différentes conceptions de systèmes CVC afin de choisir la meilleure conception. Plus précisément, HAP effectue les tâches suivantes lors d'une analyse énergétique :

- Simule le fonctionnement heure par heure de tous les systèmes de chauffage et de climatisation du bâtiment.
- Simule le fonctionnement heure par heure de tous les équipements.
- Simule le fonctionnement heure par heure de systèmes autres que CVC, y compris l'éclairage et les appareils.
- Utilise les résultats des simulations heure par heure pour calculer la consommation énergétique annuelle totale et les coûts énergétiques. Les coûts sont calculés à l'aide des caractéristiques du tarif des services publics, telles que les redevances échelonnées, l'heure et la demande, le cas échéant.
- Génère des rapports en forme tableau et graphes contenant des données horaires, journalières, mensuelles et annuelles.

7.1.5. Approches de saisie des alternatives par HAP

HAP fournit deux manières distinctes de créer des données d'entrée :

1. L'interface détaillée HAP utilise une approche « ascendante » pour créer un modèle du bâtiment et de ses systèmes CVC. Toutes les données sont directement saisies par l'utilisateur. Cette approche convient mieux aux applications de conception détaillée nécessitant un niveau de détail élevé.

2. L'interface de l'assistant HAP adopte une approche "descendante". Un utilisateur répond à un sous-ensemble relativement restreint de questions sur l'emplacement du bâtiment, le bâtiment lui-même, les solutions de remplacement du système de CVC, ainsi que les prix de l'énergie et du carburant.

HAP (Carrier, 2014) utilise ces entrées avec des hypothèses par défaut intelligentes pour générer un ensemble complet de données d'entrée détaillées pour le projet.

Cette approche convient bien aux études de conception préliminaires ou schématiques dans lesquelles vous devez sélectionner rapidement plusieurs alternatives de conception, afin d'identifier les conceptions les plus prometteuses pour une étude détaillée.

7.1.6. Analyse énergétique par HAP

Cette rubrique décrit brièvement comment utiliser le HAP pour estimer la consommation annuelle d'énergie et le coût de l'énergie pour la conception de CVC dans la phase de conception détaillée d'un projet.

La procédure d'analyse énergétique est composée de cinq étapes, indiqués sur la figure 4.7.

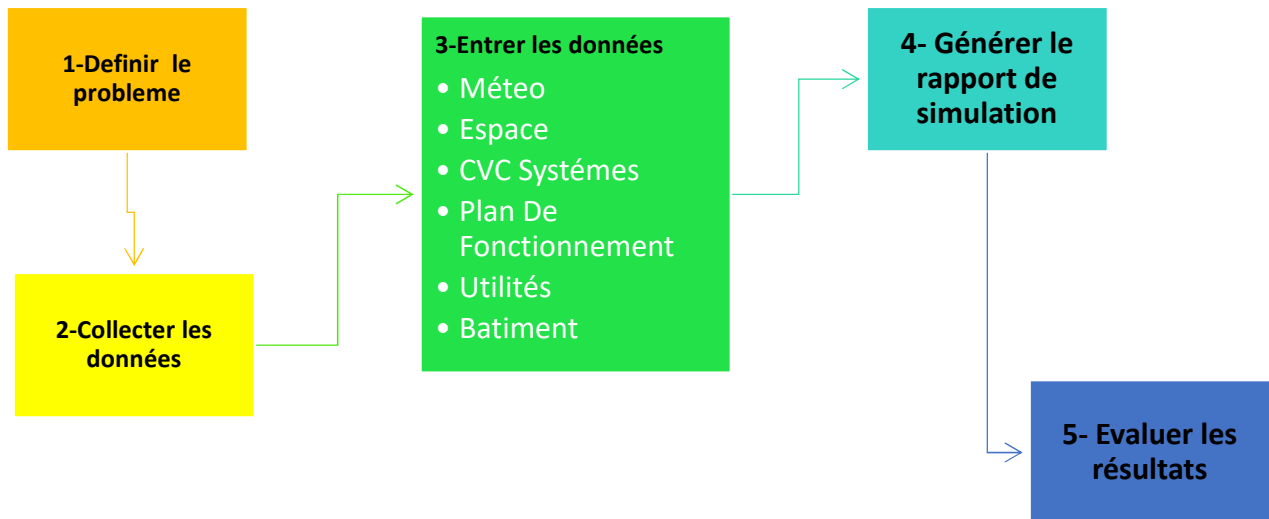


Figure 4.7 Procédure d'analyse énergétique utilisée par HAP

1. Définir le problème

Définissez d'abord la portée et les objectifs de l'analyse de conception. Par exemple, quel type de bâtiment est impliqué ? Quel type de systèmes et d'équipements sont nécessaires ? Quelles exigences particulières vont influencer les fonctionnalités du système ?

2. Collecter les données.

Avant de pouvoir effectuer les calculs de conception, il est nécessaire de recueillir des informations sur le bâtiment, son environnement et ses équipements de CVC. Cette étape consiste à extraire des données sur les plans de bâtiment, utilisation du bâtiment et à étudier les besoins du système de CVC. Les types d'informations spécifiques nécessaires incluent :

- Données climatiques de site ;
- Données sur les matériaux de construction pour les murs, les toits, les fenêtres, les portes, les dispositifs d'ombrage extérieurs et les sols, ainsi que pour les cloisons intérieures entre les zones conditionnées et non conditionnées ;

- Données sur la taille et l'aménagement des bâtiments, y compris les murs, le toit, les fenêtres, les portes et les planchers, les orientations d'exposition et les caractéristiques d'ombrage extérieur ;
- Les caractéristiques de la charge interne sont déterminées par les niveaux et les horaires d'occupation, les systèmes d'éclairage, les équipements de bureau, les appareils et les machines situés dans le bâtiment ;
- Données concernant l'équipement, les commandes et les composants CVC à utiliser.

3. Entrer les données dans HAP

Puis, utilisez HAP pour entrer des données sur le climat, les bâtiments et l'équipement de CVC. Dans la fenêtre principale du programme, créez d'abord un nouveau projet ou ouvrez un projet existant. Définissez ensuite les types de données suivantes nécessaires au travail de conception du système :

- Entrer les données météorologiques. Les données météorologiques définissent les conditions de température, d'humidité et de rayonnement solaire rencontrées par le bâtiment au cours d'une année. Ces conditions jouent un rôle important dans l'influence des charges et du fonctionnement du système. Pour définir les données météorologiques, vous pouvez choisir une ville dans la base de données météo du programme ou saisir directement les paramètres météorologiques. Les données météorologiques sont entrées à l'aide du formulaire de saisie météo.
- Entrer les données spatiales. Un espace est une région du bâtiment composée d'un ou plusieurs éléments de flux de chaleur et desservie par un ou plusieurs terminaux de distribution d'air. Habituellement, un espace représente une seule pièce. Cependant, la définition d'un espace est flexible. Pour certaines applications, il est plus efficace pour un espace de représenter un groupe de pièces ou même un bâtiment entier.

Pour définir un espace, tous les éléments qui affectent le flux de chaleur dans cet espace doivent être décrits. Les éléments comprennent les murs, les fenêtres, les portes, les toits, les puits de lumière, les planchers, les occupants, les éclairages, le matériel électrique, les sources de chaleur diverses, les infiltrations et les cloisons. Les données sont saisies à l'aide du formulaire de saisie d'espace.

Lors de la définition d'un espace, des informations sur la construction des murs, des toits, des fenêtres, des portes et des dispositifs d'ombrage extérieurs sont nécessaires, ainsi que des informations sur les programmes horaires pour les gains de chaleur internes. Ces

données de construction et de planning peuvent être spécifiées directement à partir du formulaire de saisie d'espace (via des liens vers les formulaires de construction et de planning), ou bien être définies avant la saisie de données d'espace.

Les informations sur les espaces sont stockées dans la base de données du projet et sont ensuite liées aux zones d'un système d'air.

- Entrer les données du système d'air. Un système d'air est l'équipement et les commandes utilisés pour fournir la climatisation et le chauffage à une région de bâtiment. Un système d'air sert une ou plusieurs zones. Les zones sont des groupes d'espaces ayant un seul contrôle thermostatique. Les exemples de systèmes comprennent les systèmes de traitement de l'air des stations centrales, les unités de toit emballées, les unités verticales emballées, les systèmes divisés, les ventilo-convecteurs DX, les ventilo-convecteurs hydroniques et les thermopompes. Dans tous les cas, le système d'air comprend également des conduits associés, bornes d'alimentation et de contrôle.

Pour définir un système d'air, les composants, les commandes et les zones associées au système doivent être définis, ainsi que les critères de dimensionnement du système. Ces données sont entrées dans le formulaire de saisie du système d'air. Chaque projet peut contenir jusqu'à 5000 systèmes.

- Entrer les données de l'installation. Une installation est l'équipement et les commandes utilisés pour assurer la climatisation via de l'eau refroidie ou le chauffage via de l'eau chaude ou de la vapeur pour alimenter des serpentins dans un ou plusieurs systèmes à air. Les exemples incluent les installations de climatisation, les installations d'eau chaude, les installations de chaudière à vapeur et les installations de chauffage et de climatisation à distance.

Cette étape est facultative. Il n'est requis que si de l'eau refroidie, de l'eau chaude ou des installations à vapeur sont utilisées dans votre bâtiment. Pour définir une centrale à des fins d'analyse énergétique, il faut définir le type de centrale et les systèmes d'air qu'elle dessert, ainsi que la configuration, les commandes et les informations relatives au système de distribution.

- Entrer les données utilitaires. Les données sur les tarifs des services publics définissent les règles de tarification de l'utilisation d'énergie électrique et de la consommation de carburant. Une structure tarifaire électrique doit être définie pour toutes les études énergétiques. Un taux de carburant pour chaque source de carburant non électrique doit également être défini. Les données de tarification électrique sont saisies à l'aide du

formulaire de tarification électrique. Les données de taux de carburant sont entrées à l'aide du formulaire de taux de carburant.

- Entrer les données du bâtiment. Un bâtiment est simplement le conteneur de tous les équipements consommateurs d'énergie inclus dans un seul cas d'analyse énergétique. Un bâtiment est créé pour chaque variante de conception prise en compte dans l'étude. Les données de bâtiment comprennent les listes d'installations et de systèmes inclus dans le bâtiment, les tarifs de services publics utilisés pour déterminer les coûts énergétiques et les données relatives à la consommation d'énergie ou de combustible autre que du système de CVC.

4. Générer les rapports de simulation

Pour générer des rapports de simulation de bâtiment, accédez à la fenêtre principale du programme et sélectionnez les bâtiments souhaités. Si les données d'un seul bâtiment sont en cours d'évaluation, sélectionnez un seul bâtiment. Si vous comparez la consommation d'énergie et les coûts d'un certain nombre d'alternatives, sélectionnez un groupe de bâtiments. Ensuite, choisissez l'option "Imprimer / Afficher les résultats de la simulation" dans le menu Rapports. Ceci affiche la boîte de dialogue de construction de rapports de simulation. Choisissez les rapports souhaités. Appuyez ensuite sur Aperçu pour afficher les rapports ou sur Imprimer pour imprimer directement les rapports. Si des calculs de système, d'installation ou de bâtiment sont nécessaires pour fournir les données de vos rapports, HAP exécutera automatiquement ces calculs en premier. Sinon, si aucun calcul n'est nécessaire, les rapports sont générés immédiatement.

Des rapports de simulation pour les systèmes d'air individuels et les installations inclus dans l'analyse peuvent également être générés. Utilisez la même procédure, mais sélectionnez plutôt des éléments de système d'air ou d'installation. Les rapports de simulation des systèmes et des installations fournissent des informations plus détaillées sur les performances des équipements individuels. Ils sont souvent utiles pour en savoir plus sur les performances des équipements et pour résoudre les problèmes liés à des résultats inattendus.

5. Évaluer les résultats.

Enfin, utilisez les données des rapports de simulation que vous avez générés pour tirer des conclusions sur l'alternative de conception la plus favorable. Dans de nombreux cas, les données sur la consommation d'énergie et les coûts énergétiques serviront à approfondir les études d'analyse du cycle de vie.

7.2. Méteonorm7

METEONORM est un recueil très complet de données météorologiques. Il contient également des algorithmes permettant de créer – à partir des valeurs mesurées – des fichiers météo depuis n'importe quel endroit sur le globe.

METEONORM est un outil de référence qui s'appuie sur plus de 25 années d'expérience dans les bases de données météorologiques. Ce logiciel contient une base très exhaustive de données météorologiques mais également des algorithmes permettant de créer, à partir des valeurs mesurées, des fichiers météo de n'importe quel endroit sur le globe.

Bases de données :

- Base de données contenant plus de 8 325 stations météo
- Paramètres mesurés : moyennes mensuelles du rayonnement global, température, humidité, précipitation, jours avec précipitation, vitesse et direction du vent, durée d'ensoleillement
- Périodes couvertes : 1961 à 1990 et 2000 à 2009 pour les données de température, d'humidité, de précipitations, de vitesses du vent. -Données de rayonnement global mises à jour pour la période 1981- 2010
- Nouveaux paramètres dérivés : pluie battante, spectre UV-A/B et rayonnement érythémateux - Utilisation de données satellite pour régions à faible densité de stations météo
- Couvre l'ensemble du globe, y compris les régions polaires

Modèles :

- Temps de résolution d'une minute pour les paramètres d'ensoleillement
- Algorithmes d'interpolation pour rayonnement solaire et d'autres paramètres pour n'importe quel endroit sur terre -Inclusion de modèles de changement climatique (Hadley CM3 model).
- Ajout de données mensuelles actuelles via Internet -Fonction d'import de données pour données utilisateur
- Calcul de rayonnement pour surfaces inclinées,
- Tient compte du phénomène des 'horizons hauts' (montagnes) dans le calcul du rayonnement (calcul automatique pour toutes les régions montagneuses)
- Algorithmes adaptés aux derniers résultats des travaux de recherche dans l'union européenne (5ème programme cadre)
- Génération de températures améliorée grâce à des distributions mesurées
- Calcul du lever et coucher du soleil pour chaque jour
- Interface graphique avec sélection par carte
- Affichage graphique des résultats

- 28 formats de sortie prédéfinis ; possibilité de formats utilisateur.
- L'interface utilisateur supporte 5 langues : Français, Anglais, Allemand, Italien, Espagnol
- Manuel électronique, aide en ligne avec cartes et illustrations sont disponibles en Anglais et Allemand

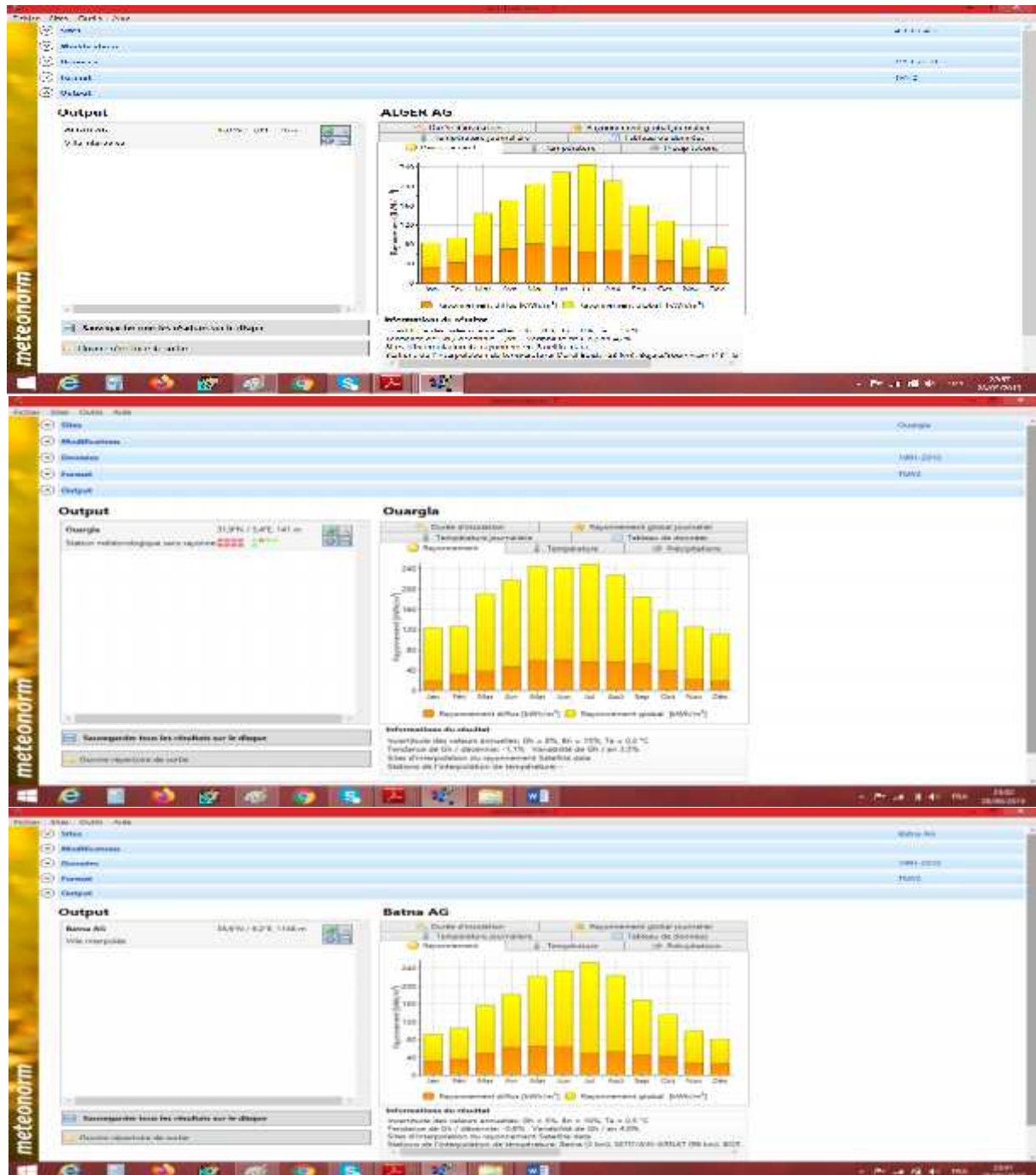


Figure 4.8 Image des fichiers de météo créée par logiciel météo norm pour trois villes (source auteur.)

Partie 2 : Résultats et discussion

Introduction

Dans cette partie nous arrivons à finaliser notre travail par un processus de simulation sur 8760 h de l'année à l'aide de logiciel HAP. Dans la première étape nous présentons les résultats de simulation énergétique d'un bureau standard, la deuxième comprend les résultats d'évaluation des impacts des mesures d'efficacité énergétiques sur l'intensité énergétique de chauffage et de climatisation et la dernière étape montre les résultats de la combinaison des mesures optimal pour chaque ville. Les réductions possibles sont évaluées en termes de consommation finale, coût d'énergie et émission CO₂.

1. Evaluation énergétique de bureau standard

1.1. Détermination des puissances de chauffage et de climatisation

La figure 4.9 montre la puissance des systèmes de chauffage et de climatisation pour les trois villes étudiées avec les caractéristiques du bureau standard. Les puissances des systèmes de chauffage et de climatisation sont calculées pour une température de consigne d'hiver de 21°C, et une température de consigne en été de 24°C. Il est à noter que la puissance de chauffage à installer pour un bureau situé à Batna est le plus puissant par rapport aux autres villes qu'est de 2.3 kW avec 1.8 kW pour Alger et 1.6 pour Ouargla et ça reviens sur l'effet de climat froid de Batna. Par contre la puissance de climatisation la plus importante est enregistré au niveau de Ouargla qui représente un climat très chaud avec une puissance de 7.4 kW.

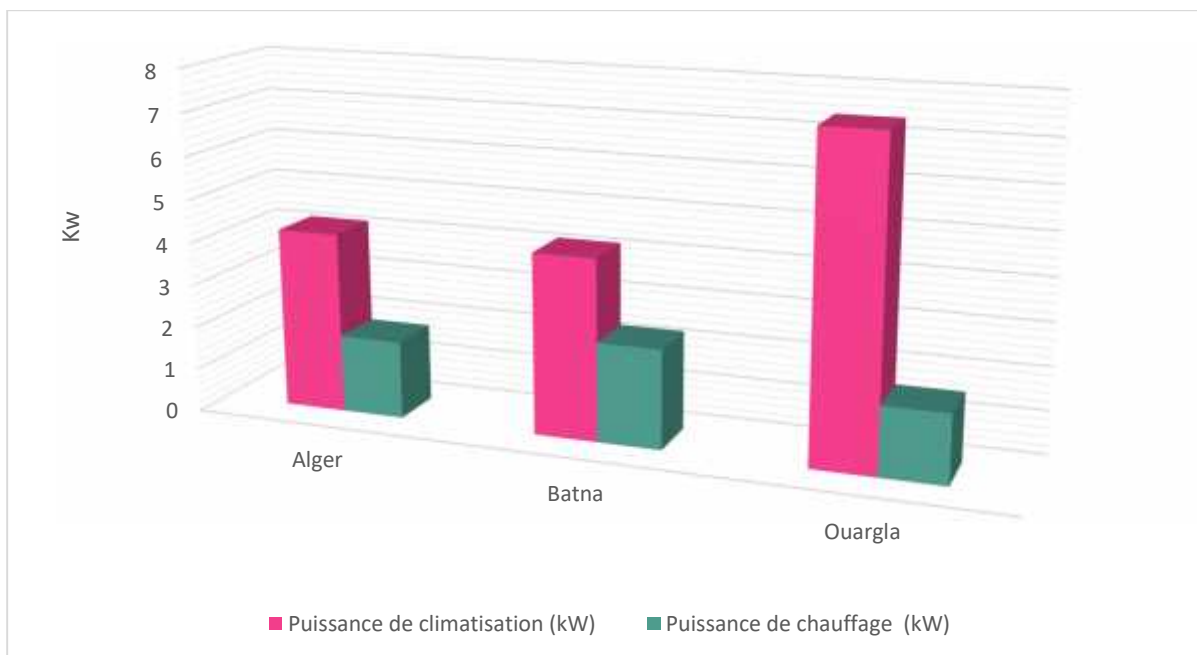


Figure 4.9 Puissance des systèmes de climatisation et de chauffage.

1.2. Répartition de la consommation annuelle d'énergie

Après l'identification des puissances nécessaires pour le chauffage et la climatisation. Les résultats de simulation montrent dans la figure 4.10 que la répartition majoritaire de la consommation énergétique revient au poste de climatisation qui représente environ 42 % pour Alger, 38 % pour Batna et 63 % pour Ouargla. Par contre, le poste de chauffage reste négligeable pour la ville d'Ouargla avec 1 % et représente 12 % pour la ville de Batna qui se caractérise par un hiver froid.

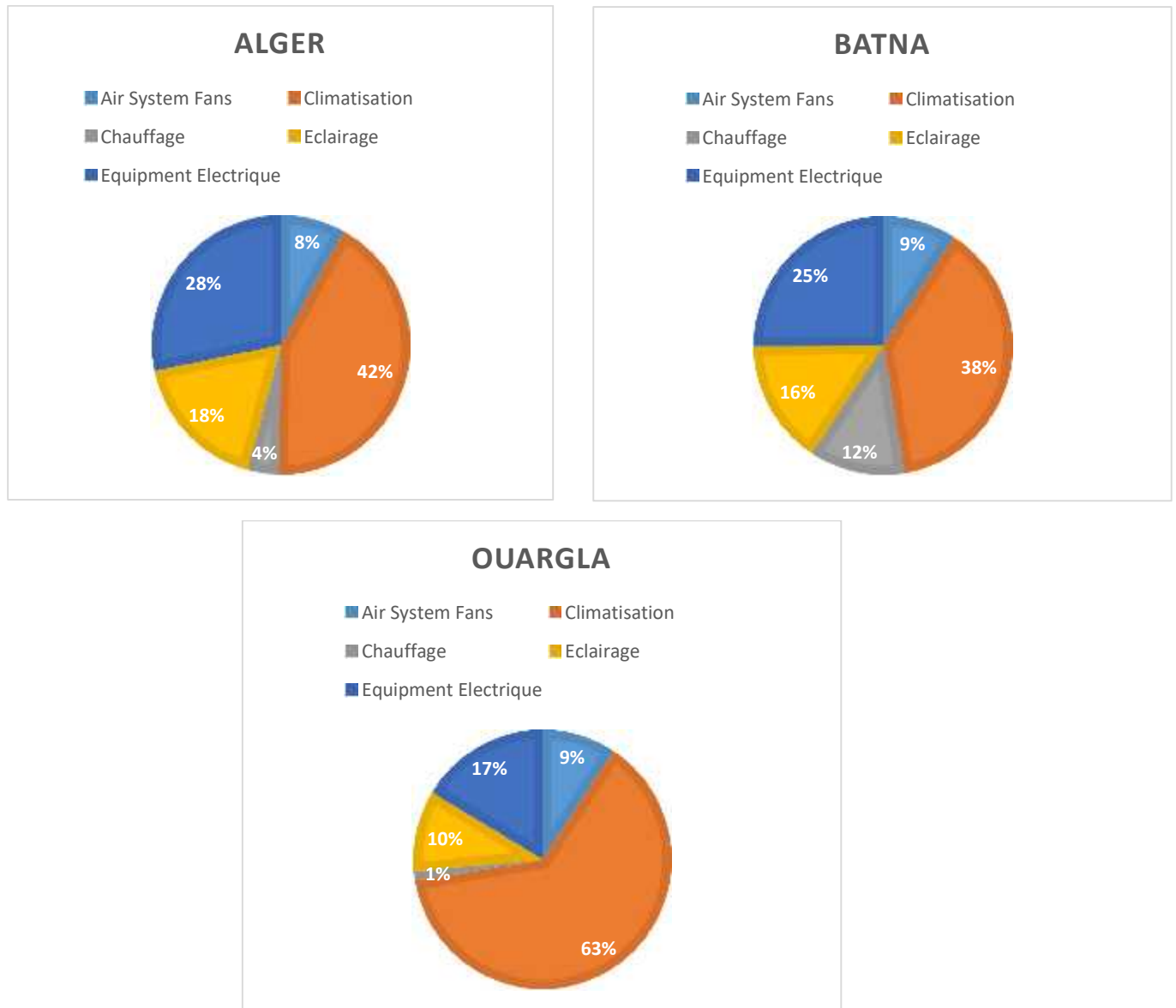


Figure 4.10 : Répartition par usage de la consommation énergétique annuelle dans les trois villes.

1.3. La consommation mensuelle de chauffage et de climatisation

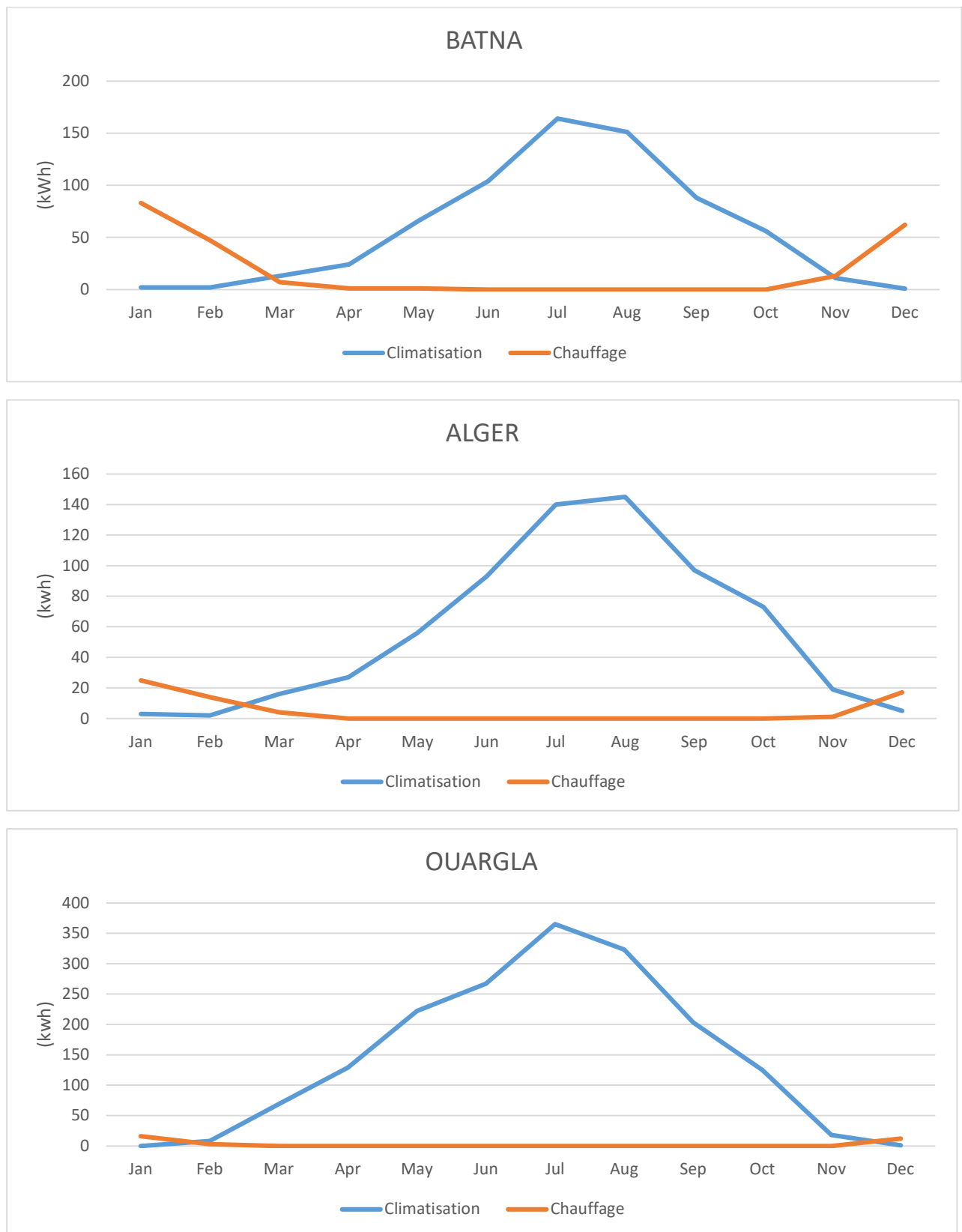


Figure 4.11 La consommation mensuelle en énergie de climatisation et chauffage, a) Batna b) Alger c) Ouargla.

D'après les trois diagrammes de la figure 4.11, on constate que la consommation de chauffage et climatisation varie avec le climat propre aux villes.

Il s'avère que le besoin en climatisation est plus considérable que le besoin en chauffage pour la ville d'Ouargla qui représente un climat très chaud avec un moyen de 8 mois pour la période estival. Par contre la ville de Batna enregistre une période de besoin en chauffage plus importante que les autres villes parce qu'elle présente un hiver très froid qui dure de novembre jusqu'à avril (6 mois) avec des températures inférieures à 0°C.

1.4. Coûts d'énergie annuels

La figure 4.12 ci-dessous présente le coût annuel d'énergie consommée en dinar par le bureau standard dans les trois villes, ce cout contient toutes les charges de tarification exigée par l'état.

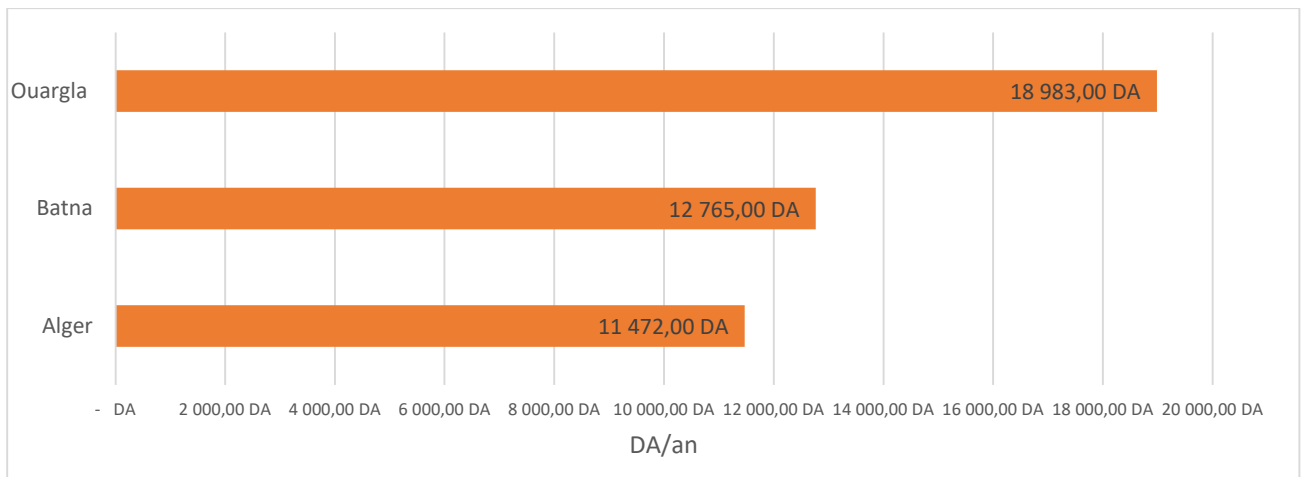


Figure 4.12. Coûts d'énergie annuels pour chaque site

1.5. Emission de gaz CO₂

La figure 4.13 présente les émissions de gaz à effet de serre CO₂ généré par la consommation d'énergie de bureau standard dans les trois villes. Ces émissions sont calculées à travers le facteur de conversion.

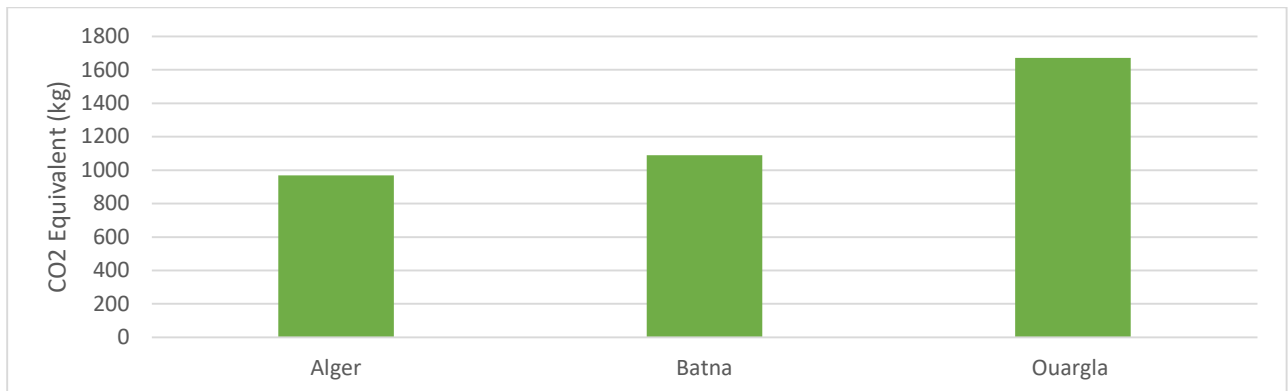


Figure 4.13 Emission de gaz à effet de serre CO₂ de chaque site.

2. Evaluation Des mesures d'efficacités énergétiques proposées

2.1. Impact de l'orientation

En ce qui concerne l'impact de l'orientation du bâtiment, les résultats ont montrés que la demande d'énergie de chauffage annuel minimum était dans la façade sud, avec l'intensité de l'énergie de chauffage estimée la plus faible par 3.152, 11.006 et 0.003 KWh / m² respectivement pour Alger, Batna et Ouargla ; parce que l'orientation sud est exposée aux rayons solaires durant la période hivernale comme le montre la figure 4.14. En outre, la demande annuelle minimale en énergie de climatisation se situait dans la façade nord du modèle de bâtiment avec la plus faible intensité de climatisation estimée respectivement à 25 411, 25 984 et 66 257 KWh / m² pour Alger, Batna et Ouargla ; ceci s'explique par la non exposition aux rayons soleil pour orientation nord. Par conséquent, la modification de l'orientation du bâtiment a eu un léger effet sur l'intensité de chauffage et de climatisation pour le climat chaud (Ouargla), tandis que, pour le climat froid (Batna), elle a eu un effet plus significatif sur l'intensité de chauffage et de climatisation

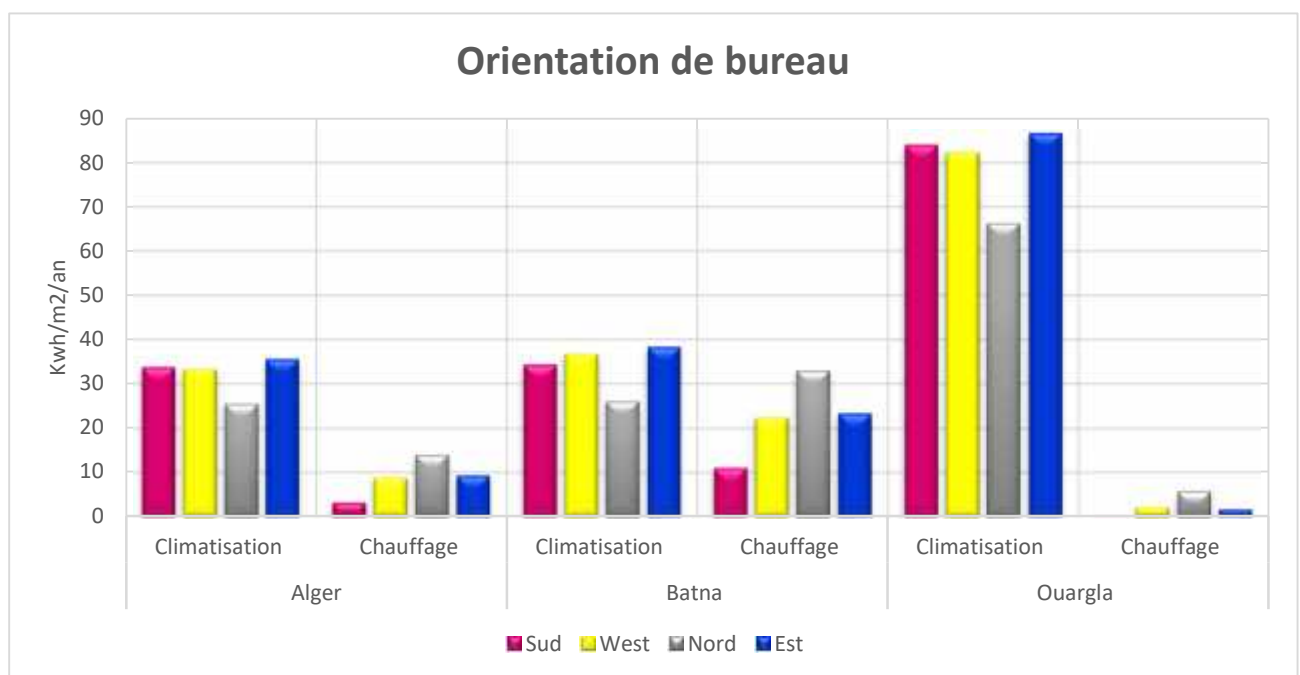


Figure 4.14 Effet de l'orientation du bâtiment sur l'intensité énergétique de la climatisation et du chauffage.

2.2. Impacts de l'isolation thermique de l'enveloppe

Amélioration de l'isolation thermique peut réduire la perte ou le gain de chaleur du bâtiment, quel que soit le matériau d'isolation utilisé. En outre, les résultats d'impact d'isolation

présenté à la figure 4.15 ont montré qu'il existait une forte corrélation entre le besoin en climatisation annuel, le besoin en chauffage et la valeur de transfert thermique de l'enveloppe.

L'isolation du toit permet de diminuer l'intensité énergétique de la climatisation jusqu'à 11,67 %, 17,41 % et 18,88 % pour des épaisseurs respectives de 0,025 m, 0,075 m et 0,1 m de polystyrène pour Alger, Batna et Ouargla. Bien que, l'intensité de l'énergie de chauffage ait diminué à 92,38 %, 80,67 % pour une épaisseur de 0,1 m de polystyrène respectivement pour Alger et Batna. De plus, ce n'est pas le même cas à Ouargla où le climat est très chaud et où l'énergie de chauffage n'est pas nécessaire pour l'orientation sud.

La réflectance solaire dépend de la couleur du toit. Les résultats de simulation ont montré, qu'on peut diminuer l'intensité énergétique de climatisation pour l'option léger avec une capacité d'absorption de 0,45, mais l'intensité énergétique de chauffage a augmenté contrairement à l'option sombre avec un pouvoir absorbant de 0,9, l'intensité énergétique de climatisation a augmenté et l'intensité énergétique de chauffage a diminué pour les trois villes.

L'isolation des murs peut légèrement diminuer l'intensité de l'énergie de climatisation à Ouargla avec l'augmentation de l'épaisseur de polystyrène jusqu'à 1,17 %, alors qu'elle a légèrement augmenté pour Alger et Batna. Pour ces derniers, l'intensité de l'énergie de chauffage a diminué avec des épaisseurs différentes de polystyrène jusqu'à 20,24 % à Alger et 18,26 % à Batna.

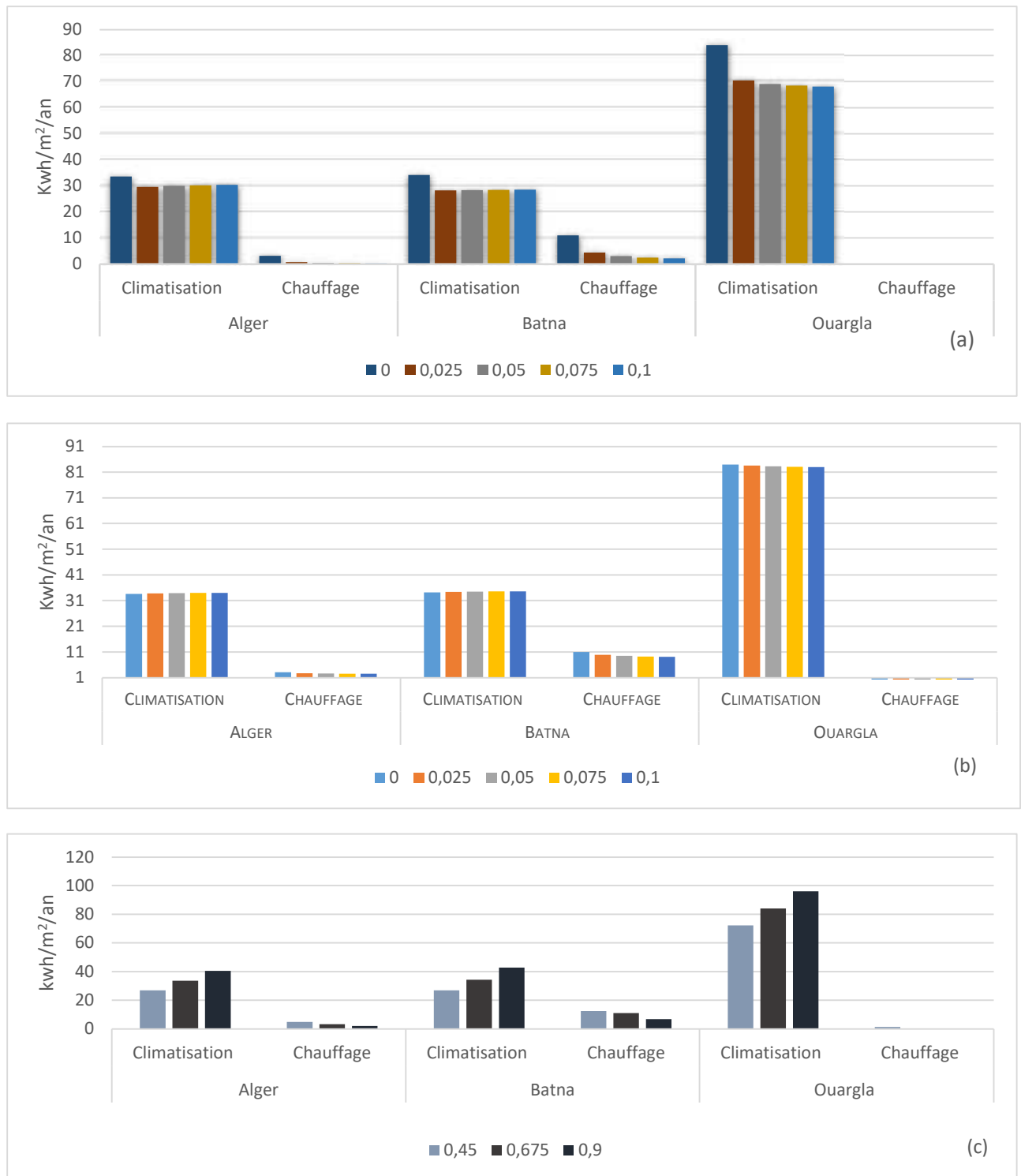


Figure 4.15 Impact de l'isolation thermique de l'enveloppe sur l'intensité énergétique de la climatisation et du chauffage (a) Isolation du toit, (b) Isolation des murs, (c) La réflectance solaire de toit

2.3. Impacts des vitrages et des protections solaires

L'impact des différents types de fenêtres sur la climatisation du bâtiment et la consommation d'énergie de chauffage est représenté sur la figure 4.16. On peut voir que l'intensité

d'énergie réduite de la vitre de fenêtre par rapport au résultat du bureau standard arrive jusqu'à 17 %, 14 % et 23 % respectivement pour Alger, Batna, et Ouargla. Par la suite, il a été constaté que, pour les climats d'Alger et Batna, le vitrage préférable pour réduire l'intensité de l'énergie de climatisation et de chauffage était classé dans les catégories suivantes : double vitrage réfléchive, double vitrage faible émissivité et double vitrage clair. Toutefois, pour le climat de Ouargla, les vitrages préférables pour réduire l'intensité de l'énergie de climatisation et de chauffage ont été classés en catégories suivantes : double vitrage réfléchive, double faible émissivité / réfléchissant, double vitrage faible émissivité double vitrage clair. Deux paramètres sont les plus importants pour le changement de la vitre ; la valeur U qui influe sur les besoins en chauffage et la valeur SHGC qui influe sur les besoins en climatisation (plus la valeur SHGC est bas, l'énergie de climatisation est plus faible).

Les résultats obtenus ont montré que l'ombrage par la protection solaire influençait sur l'énergie annuelle de climatisation et de chauffage. Tout d'abord, l'ombre interne (store) peut diminuer l'énergie de climatisation à 6,3 %, 7,5 % et 6,2 % respectivement pour Alger, Batna et Ouargla. Alors que le chauffage annuel avait légèrement augmenté.

Ensuite, les résultats de la figure 4.17 montre que l'augmentation de profondeur de la nuance externe (surplomb) peut abaisser l'intensité de l'énergie de climatisation à 8,17 %, 9,35 % et 6,56 %, respectivement pour Alger, Batna et Ouargla pour la profondeur de 0,5 m en compare par rapport au bureau standard, alors que l'intensité de l'énergie de chauffage avait augmenté linéairement avec l'augmentation de la profondeur du surplomb.

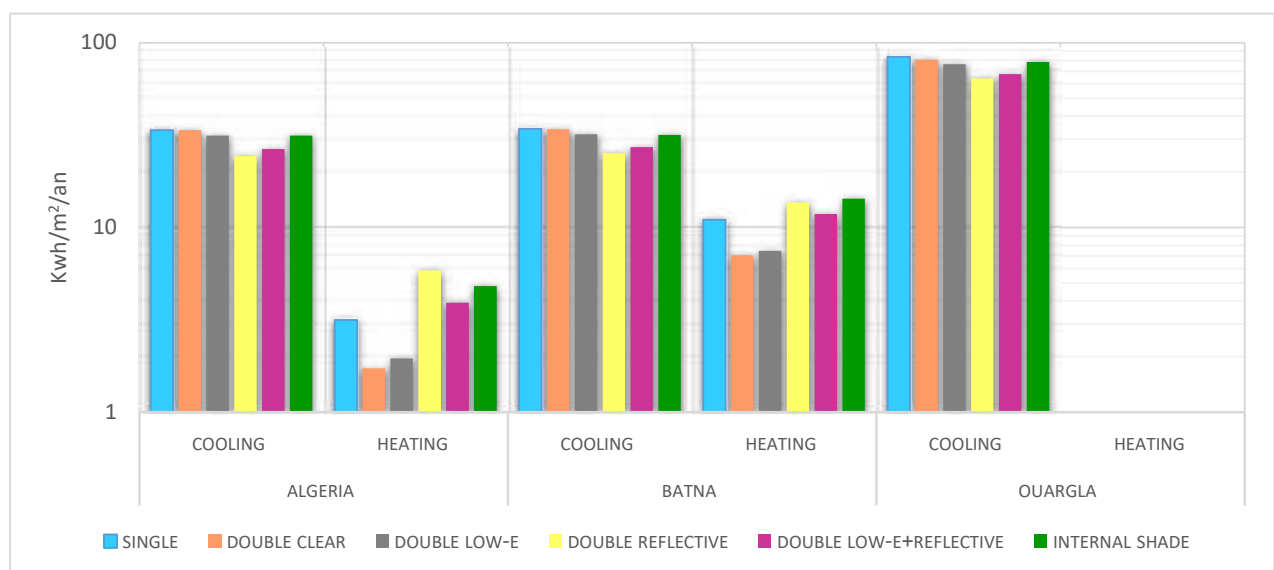


Figure 4.16 Impact de vitrage et l'ombrage interne sur l'intensité énergétique de la climatisation et du chauffage

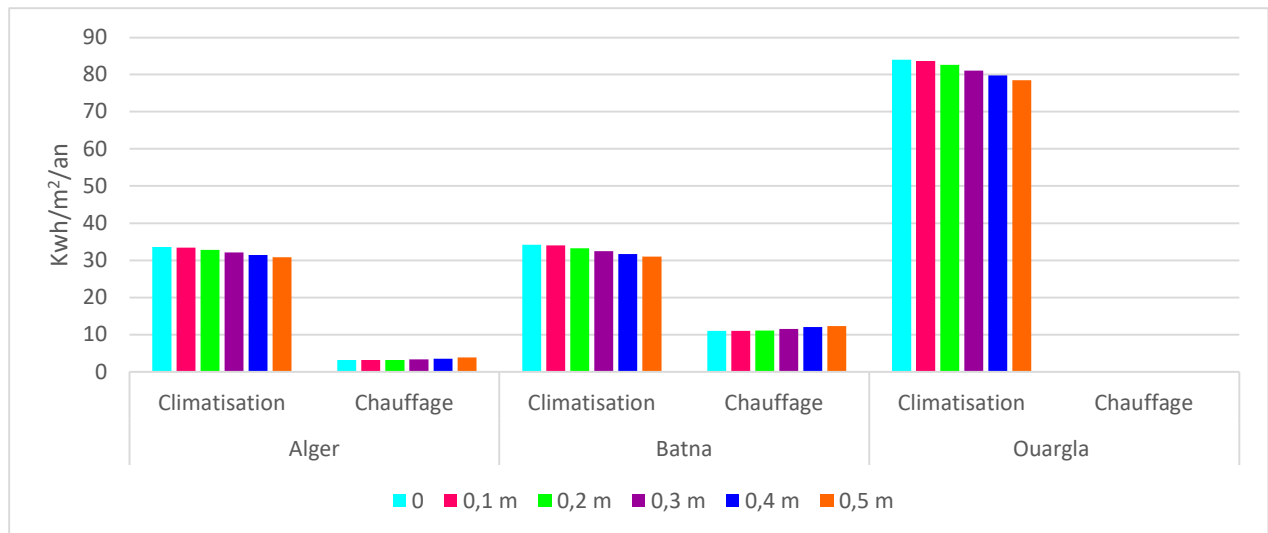


Figure 4.17 Impact de la nuance externe (over Hang) de sur l'intensité énergétique de la climatisation et du chauffage

2.4. Impact du confort thermique et du système CVC

Les impacts du système CVC sur la demande annuelle en énergie de climatisation et de chauffage sont représentés à la figure 4.18. Il est à noter que l'énergie de climatisation a diminué avec l'augmentation du point de consigne. Le système avait besoin de plus d'énergie pour atteindre le point de consigne demandé pour le confort par rapport à la norme à 24 ° C. En plus d'avoir une consommation d'énergie moindre et de réduire l'influence du système sur le besoin de chauffage et de climatisation. Il était nécessaire de choisir un système plus efficace dont le SEER et le SCOP sont bien mesurés et adaptés pour la zone d'étude.

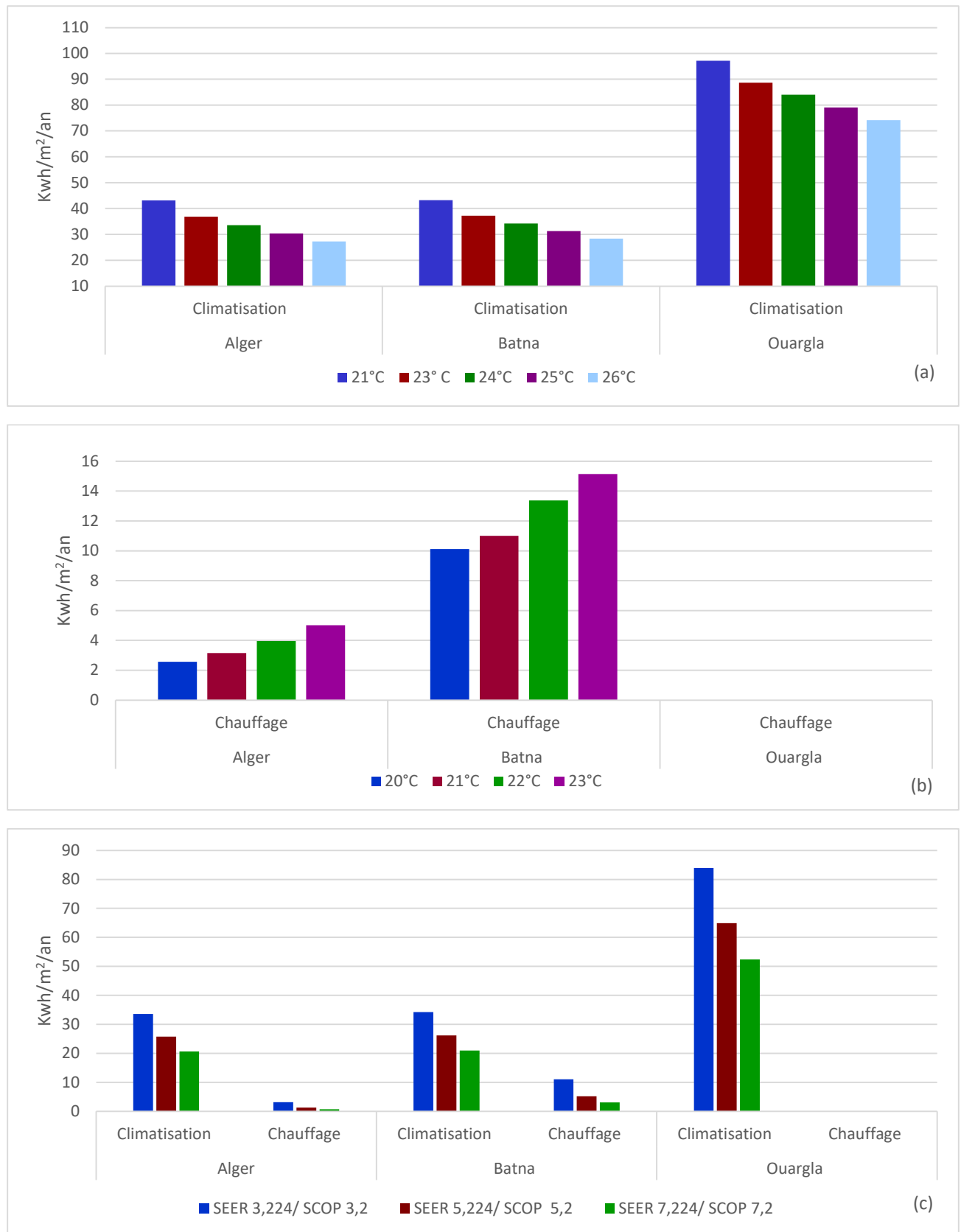


Figure 4.18 Effets du confort thermique des systèmes CVC sur l'intensité de l'énergie de climatisation et de chauffage. (a) points de consigne de climatisation, (b) points de consigne de chauffage, (c) efficacité des systèmes.

3. Détermination des mesures optimales

Les résultats d'analyse d'impact des mesures d'efficacité énergétique sont comparés aux résultats issus de simulation du bureau standard dans les conditions de référence présenté au tableau 4.7 pour chaque zone climatique. De toute évidence, certaines mesures ont de bonnes répercussions sur les exigences en matière de climatisation, telles que (fenêtre avec verre réfléchissant, nuance externe et store intérieur), d'autres sont plus efficaces en ce qui concerne les exigences de chauffage (isolation des toits et des murs, fenêtres à double vitrage), tandis que d'autres influent sur les deux. Exigences de climatisation et de chauffage (fenêtre avec verre à faible émissivité). Les impacts se varient avec le changement des zones climatiques.

Tableau 4.7 : Économies d'énergie de chauffage et de climatisation des mesures d'efficacité dans trois zones climatiques

Mesures	Symbole	Valeur	Économie d'énergie de chauffage et de climatisation %		
			Alger	Batna	Ouargla
Isolation thermique du plafond (Polystyrène))	R _{Ins}	0,025m	17,24%	27,82%	16,13%
		0,05m	17,21%	30,58%	17,74%
		0,075m	16,93%	31,64%	18,46%
		0,1m	16,69%	32,13%	18,88%
Isolation thermique de mur (Polystyrène)	W _{Ins}	0,025m	0,31%	1,83%	0,54%
		0,05m	0,47%	2,62%	0,84%
		0,075m	0,58%	3,02%	1,05%
		0,1m	0,63%	3,27%	1,18%
Réflectance de la chaleur du plafond	P _{RC}	0,45	13,77%	13,03%	12,40%
		0,9	-15,49%	-9,30%	-14,27%
Vitrage de la fenêtre	V _f	Double claire	3,91%	9,07%	3,87%
		Double faible émissivité	9,13%	12,74%	8,90%
		Double réfléchive	17,83%	13,99%	23,04%
		Double faible émissivité /réflective	17,16%	13,63%	19,42%
Protection solaire interne mobile	P _{Sm}	Store vénitien	1,16%	-1,60%	6,01%
Protection solaire externe fixe Over Hang	P _{Sf}	0,1m	0,40%	0,48%	0,37%
		0,2m	1,95%	1,86%	1,68%
		0,3m	3,46%	2,71%	3,42%
		0,4m	4,81%	3,30%	4,99%
		0,5m	6,98%	4,11%	6,54%
Points de confort de Climatisation	C _{Cl}	21°C	-24,53%	-19,30%	-15,67%
		23°C	-8,76%	-6,22%	-5,59%
		25°C	8,77%	6,49%	5,86%
		26°C	17,16%	12,62%	11,71%
	C _C	20°C	1,78%	2,09%	0,00%

Points de confort de chauffage		22°C	-2,27%	1,81%	0,00%
		24°C	-5,46%	-2,38%	0,00%
Système CVC	S _{CVC}	SEER 4,224 SCOP 4,2	12,75%	17,77%	14,78
		SEER 5,224 SCOP 5,2	26,38%	30,55%	22,73%

4. Évaluation des mesures optimales

Sur la base des analyses des résultats de la dernière section, le processus de simulation a été réduit afin d'obtenir la combinaison optimale de mesures de performance pour chaque zone climatique, en termes de consommation finale d'énergie, de rentabilité et d'émission dans l'environnement. Deux ensembles de mesures d'efficacité ont été considérés (isolation et verre de fenêtre) qui ayant le plus faible impact sur l'économie. Tandis que l'orientation, le point de consigne et le système CVC ont été conservé comme défini dans le bureau standard. Les mesures optimales d'un bureau amélioré obtenues sont présentées dans le tableau 4.8.

Tableau 4.8 : Les mesures d'efficacité optimales

Représentative ville	Plafond	Mur	Fenêtre	
	U _F (W/m²K)	U _M (W/m²K)	U _F (W/m²K)	SHGC
Alger	0.80	0.47	2.772	0.372
Batna	0.31	0.30	1.995	0.708
Ouargla	0.39	0.37	2.772	0.372

Les résultats des mesures optimales pour chaque climat sont illustrés à la figure 4.19. On a constaté que les économies d'énergie les plus importantes ont été réalisées à Ouargla, ce qu'est justifié par le climat chaud, qui prévoyait une économie d'énergie de 41 %. Le chauffage n'étant pas demandé, les mesures ont influencé que sur les charges de climatisation. Contrairement à Batna et Alger, où les climats sont froids et chauds, une économie d'énergie de 31 % et 26 % était prévue. Sous ces climats, les mesures ont eu un impact à la fois sur le chauffage et la climatisation. La consommation finale d'énergie peut être réduite et de meilleurs résultats peuvent être obtenus par rapport aux mesures proposées en sélectionnant des caractéristiques plus efficaces de l'isolation des matériaux et des propriétés des vitres de fenêtres en tant que (valeur U / SHGC). Par conséquent, il semblait que le climat avait un impact important sur la mise en œuvre de mesures d'efficacité et l'amélioration de l'énergie dans les bâtiments.

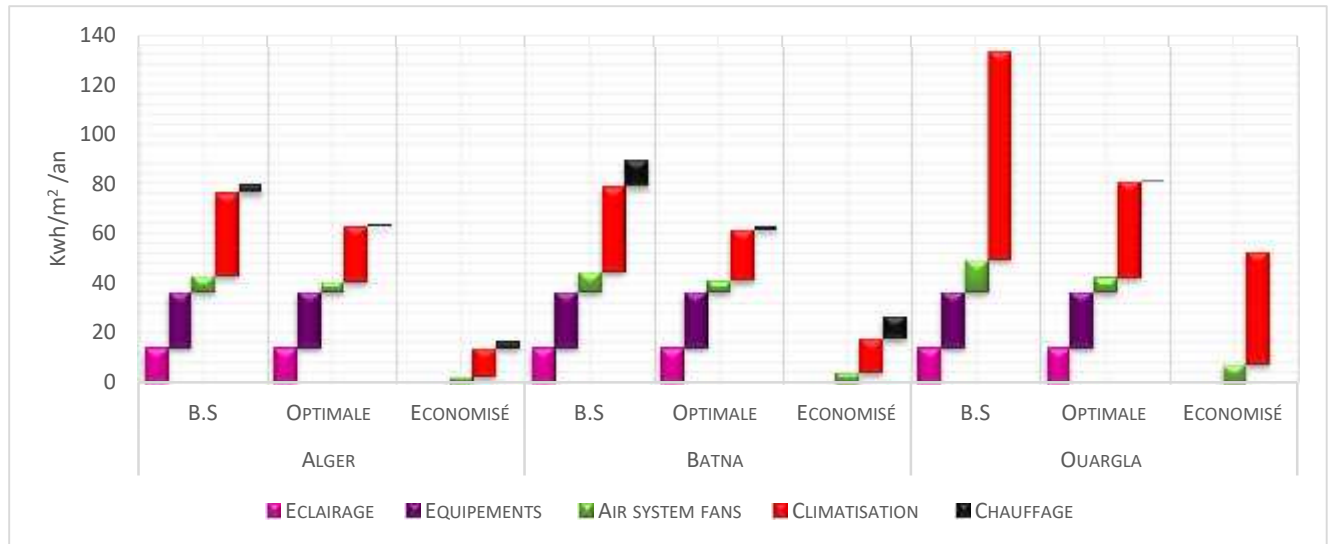


Figure 4.19 Économie de consommation d'énergie finale du bureau standard avec la combinaison de mesures d'efficacité optimales

Selon la consommation d'énergie finale, les économies de coûts avec des mesures optimales au niveau des trois climats peuvent atteindre 22 % pour Alger, 28 % pour Batna et 39 % pour Ouargla. Les résultats obtenus sont illustrés à la figure 4.20, les résultats de la consommation d'électricité annuelle détaillée dans l'annexe 3.

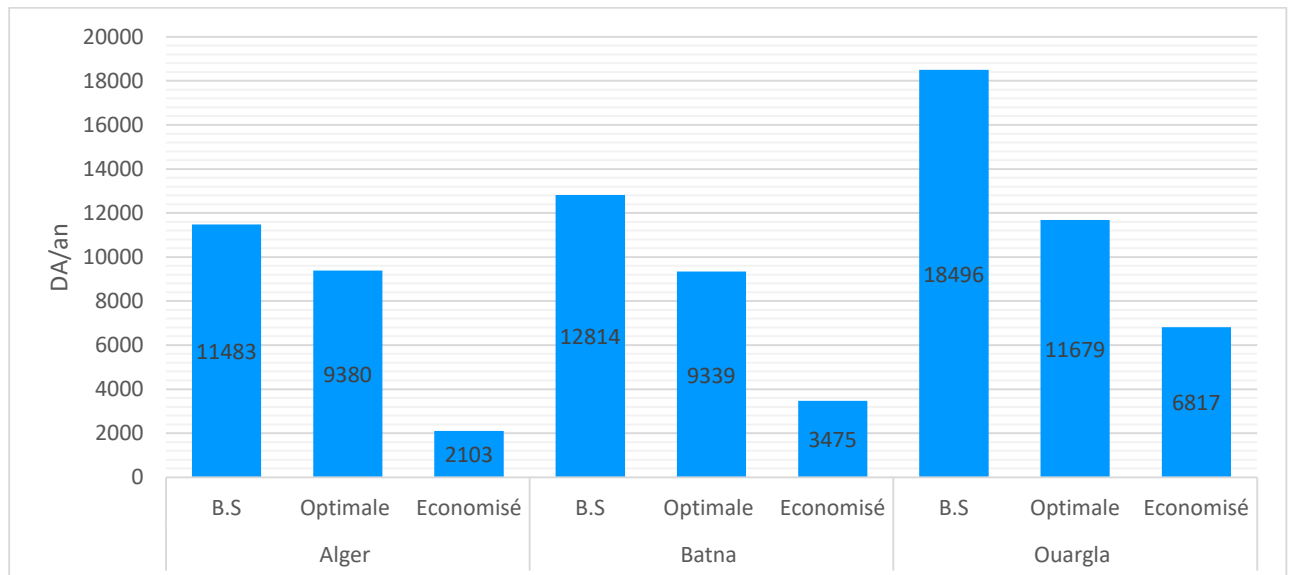


Figure 4.20 Économies de cout d'énergies totales en DA d'un bureau standard et la combinaison de mesures d'efficacité optimales

Les résultats concernant les gaz à effet de serre dans cette étude étaient basés sur la consommation d'énergie finale et ont été multipliés par des facteurs de conversion spécifiques,

comme expliqué à la section (6). Les résultats montrent donc à la figure 4.21 que les émissions de CO₂ peuvent être réduites respectivement de 25 %, 30 % et 41 % pour Alger, Batna et Ouargla. En résumé, réduire l'empreinte carbone des bâtiments contribue à la protection de l'environnement et à la réalisation d'objectifs durables. De plus, certains paramètres doivent être prise en compte tel que la source d'énergie (électricité ou gaz naturel) pour déterminer les facteurs de conversion du CO₂ et la nature des mesures qui seront mises en œuvre.

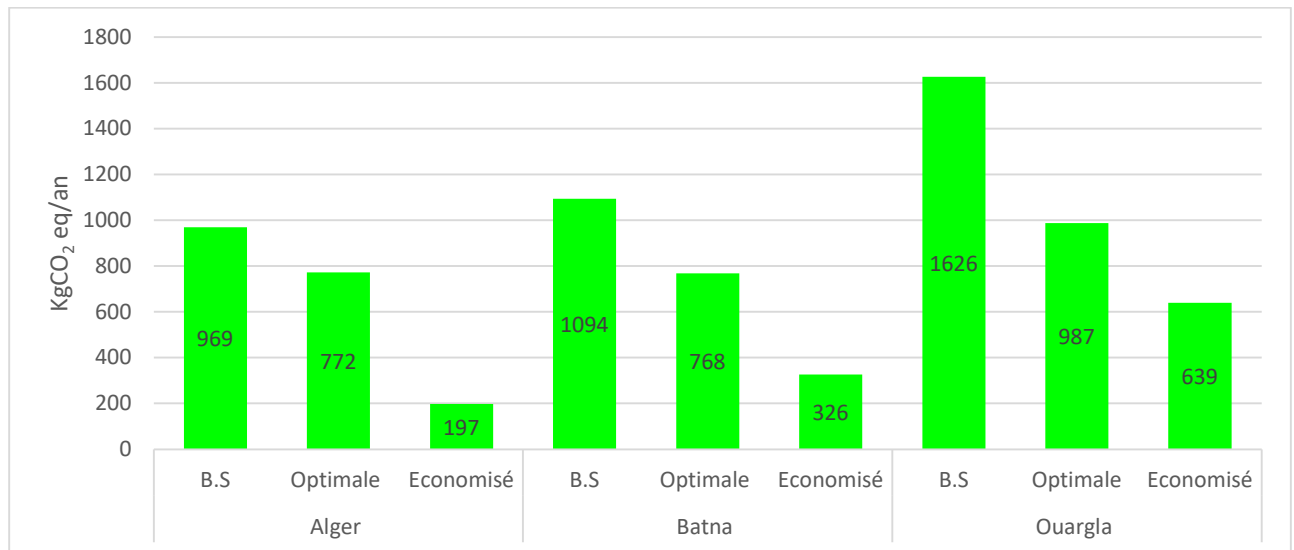


Figure 4.21 Emission CO₂ d'un bureau standard et la combinaison de mesures d'efficacité optimales

Conclusion

L'objectif de l'étude étant mis au point : évaluer l'évolution des besoins énergétiques en fonction des mesures d'efficacité énergétique choisies, sur un bâtiment conçu sur la base des pratique constructives et de données géographiques et météorologiques locales.

Dans ce chapitre nous avons eu une idée sur le comportement énergétique d'un bureau standard avec les caractéristiques existants actuels dans trois villes de l'Algérie sous l'influence de trois climats. Suivant ces résultats nous avons pu améliorer cette situation par la mise en place des mesures d'efficacité énergétique optimale pour chaque ville dans le cadre d'application des exigences de programme national d'efficacité énergétique et réduire les impacts environnementaux des bâtiments.

Conclusion générale

L'objectif annoncé par le gouvernement algérien est de réaliser une économie d'énergie primaire d'environ 9 % à l'horizon 2030 à travers la mise en place d'un programme d'efficacité énergétique dans les différents secteurs économiques. Parmi ces secteurs, le bâtiment qui est le plus énergivore de tous les secteurs avec une part de 44 % de la consommation énergétique totale du pays.

Pour répondre à ce contexte énergétique nous avons, présenté dans cette thèse une étude qui concerne la simulation numérique de l'impact des mesures d'efficacité énergétique dans un bâtiment tertiaire dans trois villes qui représente trois zones climatiques différentes.

Au terme de ce travail de recherche, nous avons rappelés les principales solutions d'amélioration des bâtiments en matière d'efficacité énergétique et les interactions entre les différents éléments de processus de simulation énergétique. Puis, nous avons décrit l'état de la consommation et la politique énergétique en Algérie. Ensuite, nous avons présenté notre étude de cas avec les informations indispensables pour la simulation en suivant la démarche méthodique proposé. Finalement, les résultats obtenus et leurs interprétations ont été illustrés pour chaque situation.

Au préalable, les mesures d'efficacité mises en œuvre sont: l'orientation des bureaux, l'isolation thermique, les vitrages, dispositif de protection solaire « ombrage », l'efficacité du système de CVC, et quelques points de consigne pour le confort des occupants. En outre, pour les cas de besoin en chauffage et en climatisation, les demandes ont été calculées et considérées comme deux indicateurs permettant d'évaluer l'impact des mesures pour différentes zones climatiques. En comparant et en classant les résultats obtenus, la combinaison optimale de mesures a été repérée pour chaque zone climatique en tant que bâtiment performant selon trois indicateurs: consommation énergétique finale, économie de coût énergétique et émission de CO₂.

De plus, il a été constaté que la sélection spécifique de mesures optimales varie en fonction des conditions climatiques. Les résultats combinés des mesures proposées dans cette étude ont révélé que la consommation d'énergie finale ainsi que les émissions de CO₂ pouvaient être réduites d'environ 41 %, 31 % et 26 % respectivement pour Ouargla, Batna et Alger par

rapport aux pratiques actuelles de construction en vigueur en Algérie. En outre, il pourra réduire le coût de l'énergie jusqu'à 22 % pour Alger, 28 % pour Batna, et 39 % pour Ouargla.

Ces résultats seraient plus efficaces si la «double brique creuse» existante en maçonnerie était remplacée par de meilleures alternatives telles que la brique en terre stabilisée, le béton cellulaire et par l'emploi des matériaux naturels respectueux de l'environnement,

Cependant, Ces résultats peuvent servir comme une référence de recherche dans trois zones climatiques pour l'application de programme national d'efficacité énergétique adopté par l'APRUE à l'horizon 2030.

Selon les résultats obtenus dans cette étude, il s'agit de prendre en considération, lors de l'amélioration des performances énergétiques des bâtiments, les recommandations suivantes :

- L'orientation des bâtiments était un paramètre important pour la sélection des mesures possédant les propriétés les mieux adaptées aux besoins annuels du bâtiment en énergie pour la climatisation et le chauffage dans le climat froid. Cependant, dans un climat chaud, il est d'une importance mineure en raison de l'excès de soleil toute l'année.
- Les paramètres de vitrage des fenêtres peuvent modifier la performance énergétique du bâtiment. Afin de minimiser la consommation d'énergie, il est préférable dans le climat froid d'utiliser le double vitrage à faible émissivité et que tous les verres à double vitrage soient appréciés. Alors que pour le climat chaud, une vitre réfléchissante était préférable pour réduire les rayons solaires.
- L'isolation thermique a eu l'effet le plus important sur la réduction des besoins en chauffage dans un climat froid qui manque la chaleur solaire.
- La protection solaire (ombrage), interne ou externe, avait un impact important sur la réduction de besoin en énergie de climatisation.
- Les points de consigne de la climatisation et du chauffage ont été définis dans ce cas par la réglementation nationale applicable à tous les climats, qui est de 21 ° C pour le chauffage et de 24 ° C pour la climatisation. Les résultats ont permis d'augmenter la température de consigne de la climatisation à 25 ° C pour le climat chaud; cette augmentation peut être justifiée par la différence de température significative (elle peut dépasser la température de 48 ° C à l'extérieur).

Dans cette recherche, on n'a pas étudié tous les paramètres agissant sur la consommation énergétique de bâtiment à usage de bureau, vue la complexité du thème, de ce fait nous proposons quelques futures axes de recherche :

- ❖ Il est intéressant d'étudier l'impact de l'éclairage artificiel sur la consommation énergétique et de proposer les alternatives les plus performants.
- ❖ Il est aussi préférable d'intégrer les énergies renouvelables surtout pour l'axe de climatisation solaire dans notre grand sud qui possède un terrain favorable pour ce type d'alternative d'optimisation énergétique.
- ❖ Un autre axe de recherche qui aura pour but la création d'une référence algérienne qui définit les caractéristiques optimales de l'enveloppe pour tous les climats existants, qui sera une exigence réglementaire de contrôle et de suivi pour des audits énergétiques des bâtiments.

Références bibliographiques

ALAOUI Mohamed SAIDI HASSANI. (2016), Modélisation Analytique et Simulation Numérique de l'Evaluation de l'Efficacité Énergétique des Bâtiments. Thèse de doctorat présenté par université de Mohamed 5, Rabat.

APRUE. (2015a), Programme de développement de l'efficacité énergétique à l'horizon 2030. Disponible sur : <http://www.aprue.org.dz/documents/prog.develop.energ-2030.pdf> . (Consulté Décembre 2017).

APRUE. (2015b), Consommation Énergétique Finale de l'Algérie. Disponible sur: <http://www.aprue.org.dz/documents/PUBLICATION%20CONSOMMATION%20ENERGETIQUE%20FINALE%202015.pdf> . (Consulté Novembre 2017).

ASHRAE-meteo. (2018), Algeria Climatic Design Conditions. American Society of Heating, Refrigerating, and Air-Conditioning Engineers. Disponible sur: <http://ashrae-meteo.info/places.php?algeria>. (Consulté Février 2019).

Bennadji Bouthaina et Sahli Meryem. (2016), Evaluation du confort thermique et son impact sur l'habitat collectif. Mémoire master, Université El Arbi Ben M'Hidi, Oum El Bouaghi.

Benoudjfer, et al. (2012), Etude comparative relative à l'efficacité énergétique de deux appartements situés à Bechar, Algérie, revue des énergies renouvelables, volume 15, N° 1, Alger.

Blervaque Hubert. (2015), modélisation des systèmes énergétiques dans les bâtiments basse consommation. Génie des procédés. Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris, France.

Bontemps Stéphanie. (2015), Validation expérimentale de modèles : application aux bâtiments basse consommation. Thèse de doctorat université de Bordeaux, France.

Bouamama Wahiba. (2013), Au sujet de la politique d'efficacité énergétique en Algérie : approche systémique pour un développement durable cas de : programme Eco-bat. Thèse de doctorat.

Boursas Abderrahmane. (2013), Etude de l'efficacité énergétique d'un bâtiment d'habitation à l'aide d'un logiciel de simulation. Thèse magistère, Université Constantine1.

Brun, A., Spitz, C., Wurtz, E., Mora, L. (2010), Behavioral comparison of some predictive tools used in a low-energy building. Eleventh International IBPSA Conference, Glasgow, Scotland.

Carrier united technology. (2014), HAP v4.9; Hourly Analysis Program. Carrier Software Systems, New York. Available on; <https://www.carrier.com/commercial/en/us/software/hvac-system-design/hourly-analysis-program/>. (Consulté le 20 juin 2018)

CEC (California Energy Commission), (2018), Building Energy Efficiency Standards, www.energy.ca.gov/title24/2019standards/. (Consulté le 02 décembre 2018)

Chabane, L. (2010), Contribution méthodologique à la définition d'une procédure d'Audit énergétique dans l'habitat en Algérie, mémoire du magister, l'EPAU, Alger.

Chadi Maalouf, Carlo Ingrao, Flavio Scrucca, Tala Moussa, Alexandra Bourdot, Caterina Tricase, Andrea Presciutti, Francesco Asdrubali. (2018), an energy and carbon footprint assessment upon the usage of hemp-lime concrete and recycled-PET façades for office facilities in France and Italy. Journal of cleaner production, V (170), p1640-1653. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.10.111>.

Clara Spitz. (2012), Analyse de la fiabilité des outils de simulation et des incertitudes de métrologie appliquée à l'efficacité énergétique des bâtiments. Thèse doctorat présenté par université Grenoble, France

Commission européenne. (2018), Buildings, <https://ec.europa.eu/energy/en/topics/energyefficiency/buildings>. (Consulté le 13-Janvier-2019)

Crawley, Drury, ET Collab. (2008), Contrasting the capabilities of building energy performance simulation programs. Building and Environment. V 43(4), 661-673 p.

Derradji. L, Imessad. K, M. Amara, F. Boudali Errebai. (2017), A study on residential energy requirement and the effect of the glazing on the optimum insulation thickness. Applied Thermal Engineering, v 112, p; 975-985. <http://dx.doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2016.10.116>

E-rse. (2018). Rapport Construction durable : définition, bénéfices, labels. Article disponible sur <https://e-rse.net/definitions/construction-durable-definition-benefices-labels/#gs.pcs5ci>

Fabio Favoino et al, (2018). Building Performance Simulation and Characterization of Adaptive Facades. Book.

Fatemeh Yousefi, Yaghob Gholipoura, Wei Yan.(2017), A study of the impact of occupant behaviors on the energy performance of building envelopes using occupants' data. Energy and Buildings, 148, 182-198. <https://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.04.085>

Ferradji Kenza. (2017), Évaluation des performances énergétiques et du confort thermique dans l'habitat : Cas des logements HPE de l'OPGI de Blida. Mémoire magister, Université Mohamed Khidher, Biskra.

Forgues Daniel. (2016). Guide de conception d'un bâtiment performant, fascicule 1 notions de base et simulation énergétique. Québec.

Givoni Baruch. (1987), L'homme, l'architecture et le climat. Editions du Moniteur; Paris, p : 322.

Global ABC. (2018). Bilan mondial, vers un secteur des bâtiments et de la construction à émission zéro efficace et résilient ». Troisième édition, United Nations Environment Programme.

Harraoubia, I. (2011), La qualité du logement social en Algérie, regard sur les ouvrages du gros oeuvres », mémoire du master, école nationale supérieure d'architecture, Marseille, France.

Hensen Jan L.M. ET Roberto Lamberts. (2011), Building Performance Simulation for Design and Operation. Spon Press is an imprint of the Taylor & Francis Group.

Idelecplus. (2017), Les solutions d'efficacité énergétique pour les bâtiments industriels et tertiaires. E-book. (Consulté le 12 Novembre 2017)

IEA (International Energy Agency). (2018), Energy Efficiency 2018, OECD/IEA, Paris, www.iea.org/efficiency2018 . (Consulté le 13 Janvier 2019)

Imessad. K, R. Kharchi, S. Bouchaib, A. Chenak, S. Hakem. (2017), Mise en application de la nouvelle réglementation thermique algérienne du bâtiment. Revue des Energies Renouvelables. V 20, P 591 – 597.

Khadraoui. M A, L. Sriti, S. Besbas. (2018). the impact of facade materials on the thermal comfort and energy efficiency of offices buildings. Journal of Building Materials and Structures, V 5, P 55-64. <https://doi: 10.5281/zenodo.1285954>.

Khoukhi. M, N. Fezziou. (2012), Thermal comfort design of traditional houses in a hot, dry region of Algeria, International Journal of Energy and Environmental Engineering, 3-5. <https://doi:10.1186/2251-6832-3-5>

Kneifel, J., & O'Rear, E. (2016), reducing the impacts of weather variability on long-term building energy performance by adopting energy-efficient measures and systems: a case study, Journal of Building Performance Simulation. V 10(issue 1), P 58–71. <https://doi.org/10.1080/19401493.2016.1256431>

Koezjakov, A, D.Urge-Vorsatz, W.Crijns-Graus, M.vandenBroek. (2018), the relationship between operational energy demand and embodied energy in Dutch residential buildings. *Energy and Buildings*, V165, P233-245. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2018.01.036> .

Loonen, R. C. G. M., Favoino, F., Hensen, J. L. M., and Overend, M. (2016), Review of status, requirements, and opportunities for building performance simulation of adaptive facades, *Journal of Building Performance Simulation*. V10 (issue 2), P 205–223. <https://doi.org/10.1080/19401493.2016.1152303>

Lou Chesne. (2012), Vers une nouvelle méthodologie de conception des bâtiments, basée sur leurs performances bioclimatiques. *Architecture aménagement de l'espace*. Thèse doctorat, Université de Lyon, France.

Maaden H, A.M. Mokhtari, N. Boualla, B. Djebbar. (2016), Efficacité Énergétique de la Paroi Vitrée dans la Conception Thermique des Enveloppes des Bâtiments. *Algerian Journal of Research and Technology A.J.R.T*, V (1), P 10-16.

Madi Kaboré. (2015), Enjeux de la simulation pour l'étude des performances énergétiques des bâtiments en Afrique sub-saharienne. Thèse doctorat, Université Grenoble Alpes, France.

Magali Bodart. (2007), Eclairage naturel des bâtiments. *Cahiers de l'Urbanisme* N° 66, p 48-51.

Mazari, M. (2012), Etude et évaluation du confort thermique des bâtiments à caractère public, cas du département d'architecture de Tamda (Tizi-Ouzou). Thèse doctorat Université Tizi-Ouzou, Algérie.

MEA (Ministère de l'Energie Algérienne), 2018, Bilan énergétique année 2018. Rapport.

Mersal Amira. (2017), Green building: energy efficiency strategy. *International Journal of Architecture (IJA)*, Volume 3, Issue 1, p 46–60.

Millette, Jocelyn, Simon Sansregret and Ahmed Daoud. (2011), SIMEB: Simplified interface to DOE2 and EnergyPlus - A user's perspective - Case study of an existing building. *Building Simulation, IBPSA: Sydney, Australia*, 7 p.

Ministère d'habitats (MH). (1997), DTR C-3.2/4 « Règlement thermique des bâtiments ». Documents. Disponible sur : <http://www.cnerib.edu.dz/espace.html> . (Consulté Octobre 2017).

MLIT (Ministry of Land, Infrastructure, Transport and Tourism, Japan), (2018), Overview of the Act on the Improvement of Energy Consumption Performance of Buildings. www.mlit.go.jp/jutakukentiku/jutakukentiku_house_tk4_000103.html [English version: www.mlit.go.jp/common/001134876.pdf]. (Consulté Octobre 2017)

Moujalled.B. (2007), Modélisation dynamique du confort thermique dans les bâtiments naturellement ventilés. PhD thèses, Institut national des sciences appliquées de Lyon, France

Navid Delgarm, Behrang Sajadi, Khadijeh Azarbad, Saeed Delgarm. (2018) Sensitivity analysis of building energy performance: A simulation-based approach using OFAT and variance-based sensitivity analysis methods, Journal of building engineering, V15, P 181-193. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2017.11.020>

Nima Amani (2017), Energy efficiency using the simulation software of atrium thermal environment in residential building: a case study, Advances in Building Energy Research, 13, 65-79. <http://dx.doi.org/10.1080/17512549.2017.1354781>

NRDC (Natural Resources Defense Council). (2018), Revolution Now, the Future is Here for Clean Energy Technology, rapport. www.nrdc.org/sites/default/files/revolution-now-clean-energytechnology-fs.pdf . (Consulté Octobre 2017)

NYSERDA (New York State Energy Research and Development Authority), (2018), New York Stretch Code, rapport www.nyserda.ny.gov/-/media/Files/Programs/energy-code-training/Draft-NYStretch-Code-Energy-2018.pdf . (Consulté novembre 2017)

Pyeongchan Ihm, Moncef Krarti. (2012), Design optimization of energy efficient residential buildings in Tunisia. Building and Environnement, 58, 81-90. <http://dx.doi.org/10.1016/j.buildenv.2012.06.012> .

Saint Gobain. (2016), Introduction à la thermique du bâtiment. Rapport. https://seformeravecsaintgobain.com/medias/page_essentiels/SG_ESS4_2016_BAT_HD_pap.pdf. (Consulté 18 Mars 2019).

SEMAHI Samir. (2013), Contribution méthodologique la conception des logements haute performance énergétique HPE en Algérie. Mémoire de magister présenté par l'école polytechnique d'architecture et d'urbanisme, université Alger.

Weather Base. (2017), Algeria climat classification. Disponible sur: <https://www.weatherbase.com/weather/weathersummary.php3?s=9306&cityname=Algiers,+Algeria> (Consulté Aout 2018)

Zekraoui Djamel. (2017). L'impact de l'ouverture de la façade sur la consommation de l'énergie dans les bâtiments à usage de bureau sous un climat chaud et sec. Mémoire de magister présenté à université de Biskra, Algérie.

Annexe 1 : Vérification de la conformité d'un bâtiment

La réglementation thermique algérienne actuellement en vigueur est le DTR C3.2/4¹, la vérification de la conformité d'un bâtiment vis-à-vis de cette nouvelle réglementation doit se faire pour la période d'hiver et pour la période d'été séparément.

a- Vérification d'hiver

Le DTR stipule que pendant la période de chauffage, les déperditions calorifiques par transmission à travers les parois doivent être inférieures à une valeur de référence.

$$D_T \leq 1.05 D_{\text{réf}}$$

$$D_{\text{réf}} = a \cdot S_1 + b \cdot S_2 + c \cdot S_3 + d \cdot S_4 + e \cdot S_5$$

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

b- Vérification d'été

Pour la période d'été, les apports de chaleur à travers les parois opaques (APO) et vitrées (AV) calculés à 15 h du mois de Juillet (considéré comme le mois le plus chaud de l'année) doivent être inférieurs à une limite appelée 'Apport de Référence' ($A_{\text{réf}}$).

$$A_{\text{po}}(15h) + A_{\text{v}}(15h) \leq 1.05 A_{\text{réf}}$$

Tableau A.1: Coefficients de référence

Zone	Bâtiment individuel					Bâtiment passif				
	a	b	c	d	e	a	b	c	d	e
A	0.9	2	1.2	3	3.8	0.9	2	1.2	3	3.8
A1	0.9	2	1.2	3	3.8	0.9	2	1.2	3	3.8
B	0.9	2	1	3	3.8	0.75	2	1	3	3.8
C	0.9	2	1	3	3.8	0.75	2	1	3	3.8
D	0.9	2	1.2	3	3.8	0.9	2	1.2	3	3.8

¹ DTR C3.2/4 'Document Technique Réglementaire, Réglementation Thermique Algérienne du Bâtiment', CNERIB, 2016

Annexe 2 : les températures extérieures de base (MH, 1997)

La température extérieure de base est une température telle que les températures minimales quotidiennes ne lui sont inférieures que cinq jours par an.

Par souci d'économie, une installation de chauffage n'est jamais calculée pour assurer le confort optimal pour la température la plus basse de tous les minima annuels. On utilise donc une température extérieure de référence dite température extérieure de base.

La température extérieure de base est en fonction de l'altitude et de la zone climatique où est implanté le projet. Les tableaux suivants présentent les valeurs fixes de la température extérieure de base.

Tableau A.2 : les valeurs de la température extérieure de base -hiver-

ZONE	Altitude (m)	t_{be} (en °C)	ZONE	Altitude (m)	t_{be} (en °C)
A	< 300	6	C	500 à 1000	- 2
	300 à 500	3		≥ 1000	- 4
	500 à 1000	1			
	≥ 1000	1			
B	< 500	2	D	< 1000	5
	500 à 1000	1		≥ 1000	4
	≥ 1000	1			
B'	< 500 > 500	0 voir Zone B	D'	< 1000	5

Tableau A.3 : les valeurs de la température extérieure de base – été -

Zone climatique	Température sèche $T_{sb,e}$ (°C)	Humidité spécifique $HS_{b,e}$ (g _{vap} /kg _{gas})	Ecart diurne T_b (°C)	Température moyenne T_{sm} (°C)	Ecart annuel de température RAT (°C)
A					
alt < 500 m	34	14,5	9	25,5	31
500 alt < 1000 m	33,5	13	10	25	32,5
alt 1000 m	30,5	13	9	22,5	31,5
B					
alt < 500 m	38	12,5	15	26,5	36
500 alt < 1000 m	37	11	15	26,5	36
alt 1000 m	35	10	14	25	36
B'					
alt < 500 m	41	11	18	29	41
alt 500 m	voir zone B	voir zone B	voir zone B	29	
C					
alt < 1000 m	39,5	8,5	20	27	41,5
alt 1000 m	36	8,5	18	25	40
D1	44	6,5	15,5	33	38
D2	48	5,5	16,5	36,5	43
D3	39	5,0	12,0	29,6	35

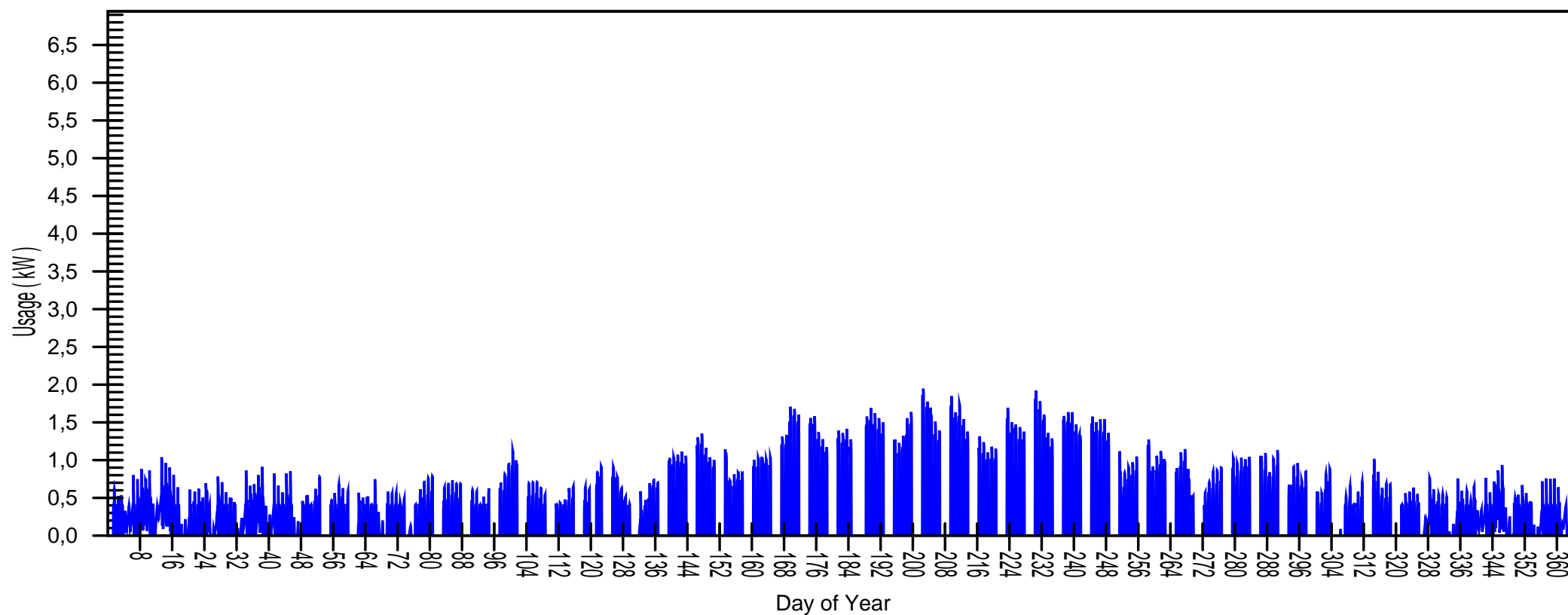
Annexe 3: Les profils de consommation d'électricité dans le cas optimale pour trois villes.

Figure A.1 Electric Use Profiles - Monday, January 1 (day 1) thru Monday, December 31 (day 365) on Batna.

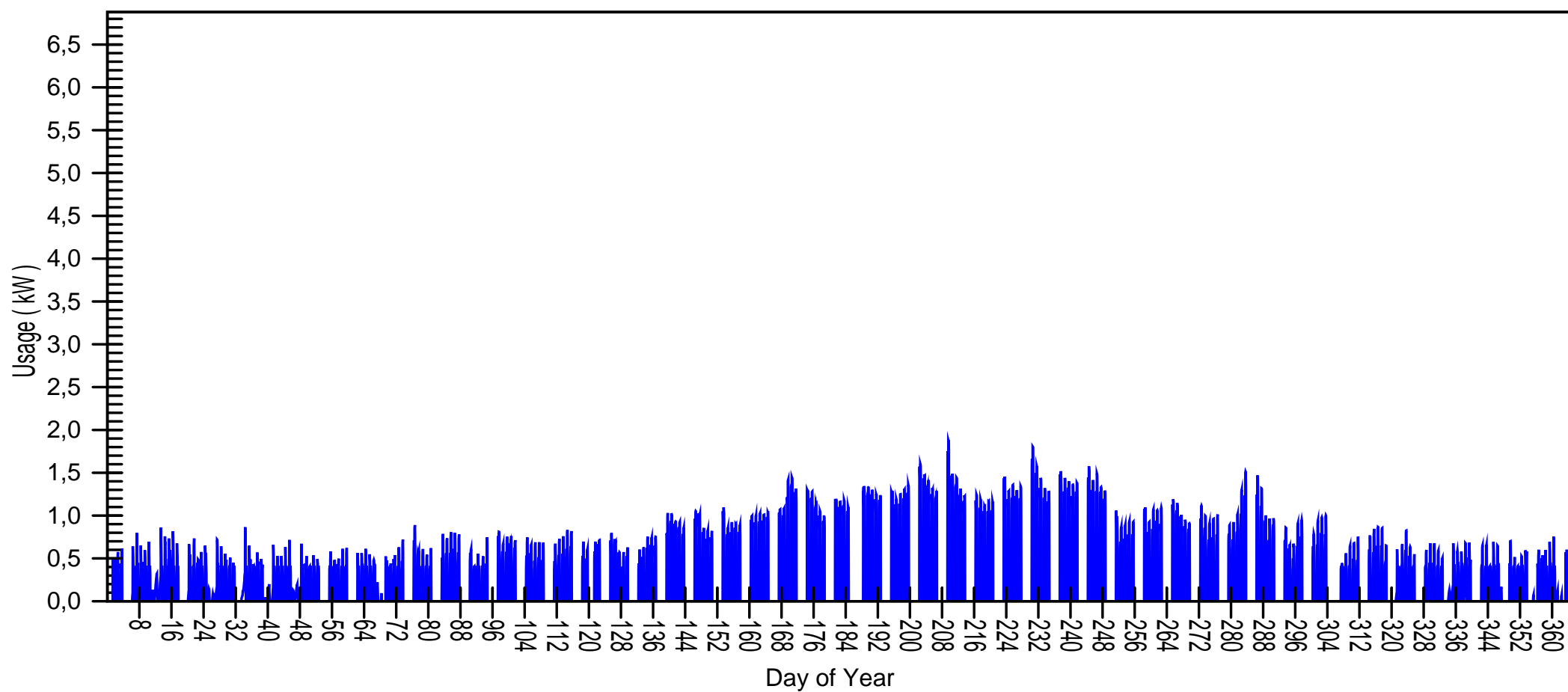


Figure A.2 Electric Use Profiles - Monday, January 1 (day 1) thru Monday, December 31 (day 365) on Algeria.

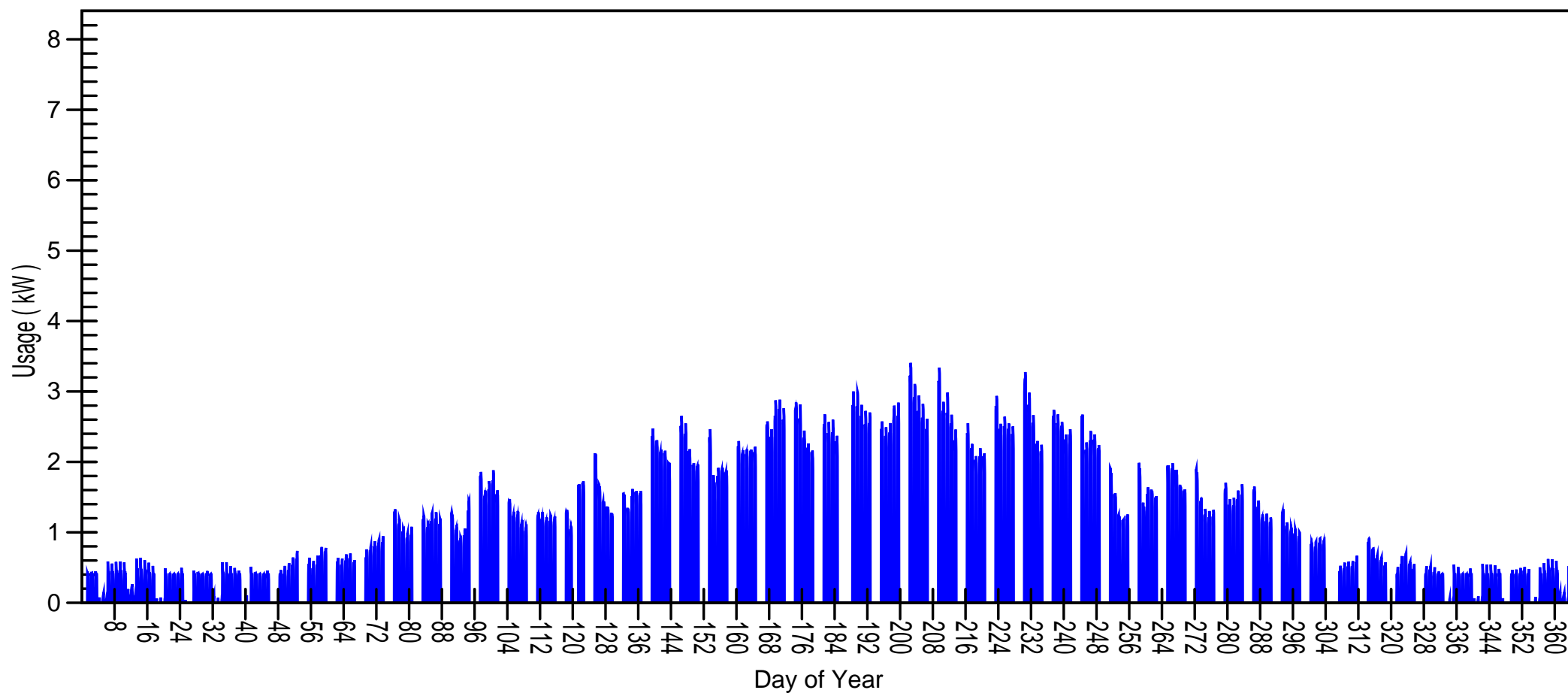


Figure A.3 Electric Use Profiles - Monday, January 1 (day 1) thru Monday, December 31 (day 365) on Ouargla.