



RÉPUBLIQUE ALGERIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE  
MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITÉ ABOU-BEKR BELKAID - TLEMCCEN

# THÈSE

Présentée à la :

FACULTÉ DES SCIENCES – DÉPARTEMENT DE PHYSIQUE

Pour l'obtention du diplôme de :

DOCTORAT EN SCIENCES

Spécialité : Énergies Renouvelables

Par :

**Mr. KADRAOUI Hicham**

Sur le thème

---

**DIAGNOSTIC ET SOLUTIONS ADAPTÉES POUR L'AMÉLIORATION DE  
L'EFFICACITÉ ÉNERGÉTIQUE D'UNE CONSTRUCTION MULTIZONE  
ÉNERGIVORE**

---

Soutenue publiquement le.....devant le jury composé de :

Mr CHABANE SARI Nasreddine	Professeur à l'Université de Tlemcen	Président
Mr BEKKOUCHE Sidi M <sup>ed</sup> El Amine	Dir de Recherche à l'URAER Ghardaïa	Directeur de Thèse
Mr CHIKHAOUI Abdelhak	Maître de Conférences Classe A à l'Université de Tlemcen	Co- Directeur de Thèse
Mr TOUAFEK Khaled	Dir de Recherche à l'URAER Ghardaïa	Examineur
Mr AMARA Sofiane	Professeur à l'Université de Tlemcen	Examineur
Mr LASRI Boumediène	Professeur à l'Université de Saïda	Examineur

*Laboratoire Automatique Tlemcen (LAT)  
BP 119, 13000 Tlemcen – Algérie*



**" La vérité est un miroir tombé de la main de Dieu et qui s'est brisé. Chacun en ramasse un fragment et dit que toute la vérité s'y trouve"**

**— Jalaluddin Rumi**

*A Ma Mère, Mon Père, Mes Frères et Mes Sœurs*

*Ainsi qu'à Tous Ceux qui me sont Chers*

# REMERCIEMENTS

Louange à Dieu le tout puissant qui m'a donné la foi, le courage et la patience pour pouvoir réaliser cette thèse.

Les travaux qui font l'objet de cette thèse ont été réalisés au sein du Laboratoire d'Automatique de l'université de Tlemcen (L.A.T.), sous la direction du Professeur Tayeb BENOUAZ. Je tiens à proclamer ici les qualités du défunt et le soutien constant qu'il m'a prodigué au cours de l'élaboration de ce travail.

Ma profonde reconnaissance va aussi au Dr Sidi Mohammed El Amine BEKKOUCHE, Directeur de thèse, Directeur de recherche à l'URAER Ghardaïa, pour l'aide, le soutien et les conseils fructueux qu'il m'a apporté au cours de l'élaboration des travaux de recherche.

Je suis très reconnaissant à Monsieur Abdelhak CHIKHAOUI, Co-Directeur de cette thèse, Maître de Conférences classe A à l'Université de Tlemcen, témoignant ainsi de l'intérêt qu'il porte à ce travail.

Je remercie vivement,

- Monsieur Naceredine CHABANE SARI, Professeur à l'Université de Tlemcen, pour l'honneur qu'il me fait en acceptant la présidence du jury.

Mes remerciements vont aussi à:

- Monsieur TOUAFEK Khaled, Directeur de recherche, à l'URAER – Ghardaïa.
- Monsieur, AMARA Sofiane Professeur à l'Université de Tlemcen.
- Monsieur, LASRI Boumediène Professeur à l'Université de Saida.

Pour avoir accepté gracieusement d'examiner ces travaux.

Un grand merci à ma très chère mère qui n'a pas cessé de me soutenir et de m'encourager durant toutes les années de mes études.

Enfin, je tiens à remercier tous ceux qui m'ont aidé à mener à terme ce travail avec sympathie.

*Hicham*

## Table des Matières

Table des Matières.....	1
Nomenclature.....	5
Acronymes et Abréviations.....	9
Table des figures.....	11
Liste des tableaux.....	15
Introduction Générale.....	17
Références.....	23

### 1. Problématiques Energétiques, Environnementales et Evolution du secteur du Batiment

1.1. Introduction.....	26
1.2. Le contexte énergétique au niveau mondial.....	27
1.3. Le contexte énergétique à l'échelle régionale (région méditerranéenne).....	29
1.4. Politique énergétique dans le secteur de bâtiment en Algérie.....	31
1.5. Optimisation de la gestion des flux énergétiques.....	35
1.5.1. L'audit Energétique.....	37
1.6. Performance énergétique du bâtiment.....	38
1.7. Stratégies d'amélioration des performances énergétiques du bâtiment.....	41
1.8. Caractérisation des besoins énergétiques dans le bâtiment.....	43
1.8.1. Méthodes passives pour réduire le besoin chauffage d'un bâtiment.....	43
1.8.2. Méthodes de rafraîchissement passives.....	44
1.9. Conclusion.....	47
Références.....	48

## 2. Conception de Batiments Energétiquement efficace : Principes et Mesures

2.1.	Introduction.....	54
2.2.	Conception de L'architecture.....	55
2.3.	Architecture bioclimatique.....	56
2.3.1.	Critère climatique et son intégration.....	57
2.3.2.	Forme et Compacité.....	59
2.3.3.	La gestion des apports solaires et l'orientation.....	60
2.3.4.	Les éléments de l'enveloppe.....	62
2.3.4.1.	Les parois opaques.....	63
2.3.4.2.	Inertie thermique.....	64
2.3.4.3.	Isolation thermique.....	65
2.3.4.4.	Ponts thermiques.....	69
2.3.4.5.	Les ouvertures.....	71
2.3.4.6.	Protection solaire.....	73
2.3.5.	L'étanchéité à l'air/ ventilation.....	74
2.3.6.	Éclairage.....	76
2.3.7.	La production d'énergie dans le bâtiment.....	77
2.3.7.1.	Pompe à chaleur.....	78
2.3.7.2.	Systèmes solaires.....	80
2.4.	Conclusion.....	83
	Références.....	85

## 3. Déperditions , Confort thermique et Bilan Energétique

3.1.	Introduction.....	91
3.2.	Comportement thermique d'un bâtiment.....	92
3.2.1.	Transfert de chaleur par transmission.....	94
3.2.1.1.	Transfert de chaleur par conduction.....	95
3.2.1.2.	Transfert de chaleur par convection.....	96
3.2.1.3.	Transfert de chaleur par rayonnement.....	97

3.2.2. L'inertie thermique des matériaux: stockage et restitution de la chaleur.....	99
3.2.2.1. Conductivité thermique.....	101
3.2.2.2. Capacité thermique.....	102
3.2.2.3. Diffusivité thermique.....	103
3.2.2.4. Effusivités.....	103
3.2.3. Transfert de chaleur à travers les parois de l'enveloppe...	105
3.2.4. Transfert de chaleur à travers les baies vitrées.....	107
3.3. Besoins calorifiques d'un bâtiment.....	109
3.3.1. Méthode des degrés jours.....	110
3.3.2. Besoin énergétique par la méthode des degrés jours.....	111
3.4. Le confort thermique.....	112
3.4.1. Les indicateurs du confort thermique.....	114
3.4.2. Evaluation du confort thermique.....	117
3.4.2.1. L'approche analytique (statique).....	117
3.4.2.2. Approche adaptative.....	119
3.4.2.3. Digrammes de confort.....	120
3.4.3. Confort hygrothermique des habitants.....	125
3.5. Diagnostic géo-climatique.....	126
3.6. Conclusion.....	129
Références.....	130

#### 4. Diagnostic et Evaluation des Besoins Energétiques dus à l'enveloppe

4.1. Introduction.....	136
4.2. Diagnostic des performances énergétiques.....	137
4.3. Description du Cas étudié.....	137
4.3.1. Description de la maison.....	137
4.3.2. Localisation géographique et données climatiques des régions étudiées.....	140
4.4. Besoins énergétiques dus à l'enveloppe .....	143

4.5.	Choix d'un modèle de confort adaptatif.....	148
4.6.	Les degrés-jours.....	148
4.7.	Déperditions thermiques.....	151
4.8.	Besoins énergétiques dus à l'enveloppe.....	153
4.9.	Conclusion.....	158
	Références.....	159

## 5. Améliorations de l'efficacité Energétique & Principales solutions

5.1.	Introduction.....	162
5.2.	Solutions bioclimatiques adoptées dans le cas d'une rénovation...	163
5.3.	Calcul des besoins énergétiques .....	164
	5.3.1. Besoins énergétiques dus à l'enveloppe .....	166
	5.3.2. Besoins en eau chaude sanitaire.....	172
	5.3.3. Apports internes dus aux occupants.....	173
	5.3.4. Apports internes dus à l'éclairage et aux équipements électriques.....	174
	5.3.5. Charges énergétiques dues aux appareils électriques et à l'éclairage.....	174
	5.3.6. Les apports solaires.....	176
5.4.	Localisation géographique et données climatiques.....	177
5.5.	Résultats des principales pistes pour améliorer l'efficacité énergétique .....	180
5.6.	Généralisation des résultats par des modèles de prédiction .....	187
5.7.	Isolation thermique et utilisation rationnelle de l'énergie.....	188
5.8.	Conclusion.....	191
	Références.....	193
	Conclusion Générale.....	194

## Nomenclature

### Chapitre 3

#### Caractères latins

S	Aire de la section de passage du flux de chaleur	(m <sup>2</sup> )
x	Variable d'espace dans la direction du flux	(m)
c	Chaleur massique du matériau	(J Kg <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> )
S	Densité volumique d'énergie générée	(W m <sup>-3</sup> )
h <sub>s</sub>	Coefficient d'échange de chaleur par convection	(W m <sup>-2</sup> K <sup>-1</sup> )
S	Aire de la surface en contact (surface d'échange)	(m <sup>2</sup> )
T <sub>a</sub>	Température du fluide loin de la paroi	(K)
T <sub>s</sub>	Température de surface	(K)
g	Accélération de la pesanteur	(m s <sup>-2</sup> )
T <sub>am</sub>	Température de l'air ambiant (K)	(K)
U	Coefficient de transmission surfacique	(W/m <sup>2</sup> . K)
R <sub>si</sub>	Résistance thermique d'échange sur la surface intérieure	( m <sup>2</sup> K W <sup>-1</sup> )
R <sub>i</sub>	Résistance thermique de chaque couche de la construction	( m <sup>2</sup> K W <sup>-1</sup> )
R <sub>se</sub>	Résistance d'échange de chaleur à la surface extérieure	(m <sup>2</sup> K W <sup>-1</sup> )
I <sub>sj</sub>	Intensité du rayonnement solaire pour l'orientation j	(Wm <sup>-2</sup> )
S <sub>sj</sub>	Surface réceptrice	(m <sup>2</sup> )
F <sub>s</sub>	Facteur de correction pour l'ombrage	(entre 0 et 1)
F <sub>F</sub>	Facteur de réduction pour les encadrements des vitrages	
g	Coefficient de transmission énergétique de la surface n	(W/m <sup>2</sup> . K)
f <sub>e</sub>	Facteur de réduction	
DJC	Degré-jour de chauffe	
DJR	Degré-jour de réfrigération	
BV	Demande nette en énergie pour le chauffage	(kWh)

$DP_{\text{envelop}}$	Pertes de chaleur totale du bâtiment	(W/K)
DJU	Degrés-jours de chauffage et de refroidissement	
$T_a$	Température d'air	(°C)
$T_{\text{rm}}$	Température radiante moyenne	(°C)
$h_c$	Coefficient des échanges convectifs	(W/m <sup>2</sup> C)
$h_r$	Coefficient des échanges radiatifs	(W/m <sup>2</sup> C)
$T_c$	Température de confort	(°C)
$T_{\text{op}}$	Température opérative	(°C)

### Lettres grecques

$\nabla$	Opérateur gradient	
$\varphi_{c,x}$	Flux thermique conductif entrant en x	(W)
$\varphi_{c,x+dx}$	Flux thermique conductif sortant en x+dx	(W)
$\varphi_g$	Flux d'énergie thermique générée (source)	(W)
$\rho$	Masse volumique du matériau	(Kg m <sup>-3</sup> )
$\lambda$	Conductivité thermique du milieu	(Wm <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> )
$c$	Capacité thermique massique du matériau	( J kg <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> )
$\varphi_{cv}$	Flux de chaleur par convection	(W)
$\lambda_f$	Conductivité thermique du fluide	(Wm <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> )
$k$	Epaisseur de la couche	(m)
$\lambda_a$	Conductivité thermique de l'air (0,0257 à 20°C)	( Wm <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> )
$\beta$	$\beta = T^{-1}$ , Coefficient de dilatation thermique (3,41.10 <sup>-3</sup> )	(K <sup>-1</sup> )
$\Delta T$	Différence de température entre l'air et la surface	( K)
$\nu$	Viscosité cinématique du fluide	(m <sup>2</sup> s <sup>-1</sup> )
$\varphi_r$	Flux de chaleur émis par rayonnement	(W)
$\varepsilon$	Emissivité du corps (= 1 pour un corps noir, < 1 pour un corps gris)	
$\sigma$	Constante de Stefan-Boltzmann = 5,67.10 <sup>-8</sup>	(W m <sup>-2</sup> K <sup>-4</sup> )

## Chapitre 4

### Caractères latins

$Q_{\text{Besoins}}$	Les besoins en chauffage et/ou en refroidissement calculés pour un bâtiment	(KWh)
$DP_{\text{envelop}}$	La somme des pertes de chaleur totale de l'enveloppe	(W K <sup>-1</sup> )
DJU	Degrés-jours de chauffage et de refroidissement	
$S_i$	Surface de la perte	(m <sup>2</sup> )
$b_i$	Coefficient de réduction des pertes de chaleur	0.8 ou 1
$U_i$	Coefficient de transmission de chaleur	(W / m <sup>2</sup> K)
$S_h$	Surface habitable	(m <sup>2</sup> )
$S_{\text{dep}}$	Surface déperditive hors plancher bas	(m <sup>2</sup> )
$R_{si}$	La résistance d'échange thermique superficielle intérieure	(m <sup>2</sup> K/W)
$R_i$	Les résistances thermiques de chaque couche de construction	(m <sup>2</sup> K/W)
$R_{se}$	La résistance d'échange thermique superficielle extérieure	(m <sup>2</sup> K/W)

### Lettres grecques

$\theta_{\text{conv}}$	Débit d'air extrait conventionnel par unité de surface habitable	(m <sup>3</sup> / h/m <sup>2</sup> )
$\eta_{\text{inf}}$	Ecoulement d'air dû à l'infiltration causée par les phénomènes thermiques	(m <sup>3</sup> /h)
$\eta_{4\text{pa}}$	Perméabilité sous 4 Pa de la zone	(m <sup>3</sup> /h)
$\eta_{4\text{pa\_env}}$	Perméabilité de l'enveloppe	(m <sup>3</sup> /h)
$Sme_{\text{conv}}$	Valeur conventionnelle d'entrée d'air par unité de surface habitable	(m <sup>3</sup> /h/m <sup>2</sup> )
$\eta_{4\text{pa\_env/m}^2}$	Valeur conventionnelle de la perméabilité sous 4 Pa	(m <sup>3</sup> /h)

## Chapitre 5

$Q_{\text{Tot}}$	Les besoins en chauffage et/ou en refroidissement calculés pour un bâtiment	(KWh)
$Q_{\text{Occup}}$	Les apports gratuits des occupants	(KWh)

$Q_{Elc}$	Les apports gratuits dus à l'éclairage et aux équipements électriques	(KWh)
$Q_{ESC}$	La quantité d'énergie nécessaire pour produire de l'eau chaude sanitaire	(KWh)
$Q_{Elc\_consom}$	Consommation moyenne des équipements électriques	(KWh)
$qV_{en}$	Le débit d'air équivalent transitant dans le logement	(m <sup>3</sup> /h)
0.34	La capacité thermique volumique de l'air	(Wh/m <sup>3</sup> K)
$P_{Chauf}$	La puissance fournie par le système de chauffage	(W)
$U_T$	Le coefficient de déperdition par transmission	(W/m <sup>2</sup> K)
$U_V$	Le coefficient de déperdition par renouvellement d'air	(W/m <sup>2</sup> K)
$\Delta T$	La différence entre la température de la pièce et celle de base	(°C)
$\rho$	La densité de l'eau qui est fonction de sa température TC égale à 1 (kg / L)	
$V_{ECS}$	Le volume d'eau	(m <sup>3</sup> )
$Nb_{occ}$	Le nombre de personnes occupant le bâtiment	
$T_{ECS}$	La température de l'eau chaude au point de remplissage	(°C)
$T_{ef}$	La température mensuelle moyenne de l'eau froide entrant dans le réservoir de stockage ou la batterie de production d'eau chaude	
$C_p$	La quantité de chaleur dégagée par l'occupant	(W/occupant)
$D_{pres/jour}$	La période de présence pendant la journée	(h/jour)
$P_{Equi\_elc}$	La puissance des appareils électriques	(W)
$Nb_{jours\_chauffés}$	Nombre de jours de chauffage	( jours / année)
$Nb_{heures}$	Nombre d'heures pendant lesquelles l'appareil est en état de fonctionnement pendant la journée	(m <sup>2</sup> )
$Nb_{jours}$	Nombre de jours pendant lesquels l'appareil est opérationnel pendant l'année	

## Acronymes et Abréviations

AIE	L'Agence internationale de l'énergie (AIE)
GIEC	Groupe Intergouvernemental d'Experts sur le Climat
ADEME	Agence gouvernementale française de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie
GES	Gaz à effet de serre
WEO	World Energy Outlook
EE	Efficacité énergétique
COP21	Conférence de Paris de 2015 sur le climat
APRUE	Agence nationale pour la Promotion et la Rationalisation de l'Utilisation de l'Energie
CNERIB	Centre National d'Etudes et de Recherches Intégrées du Bâtiment
CSTB	Centre Scientifique et Technique du Bâtiment
DTR	Documents Techniques Réglementaires
RT	Réglementation Thermique française
BBC	Bâtiment basse consommation
CVCA	Chauffage, Ventilation et Climatisation
PAC	Pompe à chaleur
COP	Coefficient de performance d'une pompe à chaleur pour le mode chaud
EER	(Efficiency Efficacy Rate) pour le mode froid
PSD	Plancher solaire direct
CESI	Chauffe-eau Solaire Individuel
SSC	Systèmes Solaires Combinés
ITI	Isolation thermique par l'intérieur
ETI	Isolation thermique par l'extérieur
ITR	Isolation thermique répartie
PT	Pont thermique
PMV	Predicted Mean Vote
PPD	Predicted Percentage of Dissatisfied
ASHRAE	American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers

AFNOR	Association française de normalisation
PIB	Produit intérieur brut est un indicateur économique de la richesse produite par année dans un pays donné
TEP	Unité de mesure de l'énergie, Elle vaut, selon les conventions, 41,868 GJ, ce qui correspond au pouvoir calorifique d'une tonne de pétrole "moyenne"
Passivhaus	Un concept global de construction de bâtiment à très faible consommation d'énergie
KYOTO	Un accord international visant à la réduction des émissions de gaz à effet de serre
ISO 7730	Ergonomie des ambiances thermiques" méthode de prévision de la sensation thermique

## Table des figures

### Chapitre 1

- Figure 1.1 Evolution de la consommation mondiale en énergie primaire en Mtep (IEA, 2017)
- Figure 1.2 Réduction des émissions de CO<sub>2</sub> liées à l'énergie selon les scénarios de stabilisation des concentrations en CO<sub>2</sub> dans l'atmosphère, Source IEA World 2008
- Figure 1.3 Consommation d'énergie finale par secteur dans le monde en 2014 (IEA, 2017)
- Figure 1.4 Répartition des émissions mondiales de GES par secteur en 2014
- Figure 1.5 Structure du potentiel d'efficacité énergétique dans la région de la Méditerranée du sud sur la période 2010-2030.
- Figure 1.6 Répartition de la consommation finale par secteur d'activité (Chiffres clés Année 2015), APRUE
- Figure 1.7 Les zones climatiques adoptées pour la réglementation thermique en Algérie
- Figure 1.8 Les trois critères de la maîtrise de l'énergie (MDE)
- Figure 1.9 Les grandes étapes de l'audit énergétique
- Figure 1.10 Coût global de l'énergie dans un bâtiment, RT 2012, Bâtiments passifs.
- Figure 1.11 Réglementation thermique et évolutions successives
- Figure 1.12 Principe Trias Energetica.
- Figure 1.13 Classification des méthodes de refroidissement passif dans les bâtiments économes en énergie.

### Chapitre 2

- Figure 2.1 Relation entre compacité et consommation de chauffage : analyse comparée de quatorze morphologies de bâtiments (Depecker, 2001).
- Figure 2.2 Disposition conseillée des pièces pour un meilleur gain
- Figure 2.3 Composants et fonctions de l'enveloppe du point de vue de la performance énergétique
- Figure 2.4 Incorporation de l'inertie thermique lors de la conception d'un bâtiment

- Figure 2.5 Les emplacements des isolants dans les façades de l'enveloppe
- Figure 2.6 Principaux ponts thermiques d'une enveloppe (Mémento technique du bâtiment)
- Figure 2.7 Caractéristique de certains types de vitrage et limites réglementaires du coefficient de transmission thermique
- Figure 2.8 Les principes de la ventilation
- Figure 2.9 Les défauts d'étanchéité des bâtiments sources de courants d'air inconfortables
- Figure 2.10 Fonctionnement d'une pompe à chaleur
- Figure 2.11 Exemple d'un système chauffe-eau solaire individuel
- Figure 2.12 Les deux types de systèmes solaires combinés
- Figure 2.13 Principales sources de réduction des consommations énergétiques et/ou émissions de gaz à effet de serre

### **Chapitre 3**

- Figure 3.1 Paramètres agissant sur la température d'un local
- Figure 3.2 Mécanisme des mouvements thermiques dans une habitation
- Figure 3.3 Bilan d'énergie pour un mur plan
- Figure 3.4 Transfert de chaleur par rayonnement au sein d'une paroi verticale
- Figure 3.5 Réaction d'un local à inertie forte et d'un local à inertie faible en présence d'apports solaires
- Figure 3.6 Choix des matériaux sur les 2 inerties
- Figure 3.7 Illustration du phénomène de transfert de chaleur entre deux ambiances séparées par une paroi opaque(mur multicouches)
- Figure 3.8 Répartition du rayonnement solaire incident sur un vitrage
- Figure 3.9 Bilan énergétique pour un local ou bâtiment donné
- Figure 3.10 Echanges de la chaleur entre le corps humain et son environnement
- Figure 3.11 Zone de confort en valeur de PMV et PDD
- Figure 3.12 Digramme psychrométrique adapté par Givoni
- Figure 3.13 Les zones bioclimatiques de l'Algérie

## **Chapitre 4**

- Figure 4.1 Géométrie et plan descriptif du bâtiment résidentiel
- Figure 4.2 Localisation géographique des sites climatiques
- Figure 4.3 Température ambiante et humidité relative pour le site de Tlemcen
- Figure 4.4 Température ambiante et humidité relative pour le site d'Alger
- Figure 4.5 Température ambiante et humidité relative pour le site de Ghardaïa
- Figure 4.6 Variations de la température extérieure moyenne pour les trois régions climatiques
- Figure 4.7 Variations des degrés jours pour les trois régions climatiques
- Figure 4.8 La part des déperditions thermiques dues à l'enveloppe du bâtiment (pas de renouvellement d'air)
- Figure 4.9 Part des déperditions thermiques par élément de l'enveloppe (pas de renouvellement d'air)
- Figure 4.10 La part des déperditions thermiques dues à l'enveloppe du bâtiment (Cas de Tlemcen avec renouvellement d'air)
- Figure 4.11 Variations des degrés jours de chauffage DJCH et de refroidissement DJR pour les trois régions climatiques
- Figure 4.12 Comparaison en termes de besoins énergétiques mensuels dus à l'enveloppe, selon le site d'implantation de l'édifice et en absence d'une ventilation
- Figure 4.13 Comparaison en termes de besoins énergétiques mensuels dus à l'enveloppe, selon le site d'implantation de l'édifice et dans le cas d'une ventilation naturelle
- Figure 4.14 Comparaison en termes de besoins énergétiques mensuels de chauffage, selon le site d'implantation de l'édifice et dans le cas d'une ventilation naturelle
- Figure 4.15 Comparaison en termes de besoins énergétiques mensuels de climatisation, selon le site d'implantation de l'édifice et dans le cas d'une ventilation naturelle

## **Chapitre 5**

- Figure 5.1 Sources principale de déperditions
- Figure 5.2 Localisation géographique des sites climatiques
- Figure 5.3 Températures moyennes mensuelles pour plusieurs régions climatiques

- Figure 4.4 Consommation globale, efficacité énergétique et système d'étiquetage des bâtiments,  $T_{conf} = 20 \text{ }^{\circ}\text{C}$
- Figure 5.5 Consommation globale, efficacité énergétique et système d'étiquetage des bâtiments,  $T_{conf} = 21 \text{ }^{\circ}\text{C}$
- Figure 5.6 Consommation globale, efficacité énergétique et système d'étiquetage des bâtiments,  $T_{conf} = 22 \text{ }^{\circ}\text{C}$
- Figure 5.7 Besoins énergétiques totaux (calculés et obtenus par régression non linéaire) en fonction de la température annuelle moyenne pour toute région climatique,  $T_{conf} = 21 \text{ }^{\circ}\text{C}$ .
- Figure 5.6 Économies d'énergie et besoins énergétiques annuels en rationalisant la consommation d'énergie.

## Liste des tableaux

### Chapitre 1

- Tableau 1.1 Récapitulatif des températures moyennes et des DJU de chauffage par zone
- Tableau 1.2 Solutions passives pour réduire la consommation énergétique liée au chauffage

### Chapitre 2

- Tableau 2.1 Principes physiques et stratégies de contrôle en architecture climatique
- Tableau 2.2 Les valeurs de U et l'épaisseur de l'isolant exigées pour chaque partie de la maison
- Tableau 2.3 Principes physiques et stratégies de contrôle en architecture climatique
- Tableau 2.4 Performances de différentes lampes
- Tableau 2.5 Volume du ballon solaire pour un chauffe-eau solaire

### Chapitre 3

- Tableau 3.1 Valeurs de la conductivité thermique pour quelques matériaux du bâtiment
- Tableau 3.2 Valeurs de la résistance thermique d'échanges superficiels
- Tableau 3.2 Températures en fonction de l'affectation du local et de l'heure de journée
- Tableau 3.2 Définition de  $i$  en fonction de la vitesse d'air
- Tableau 3.2 Echelle d'indices de confort (ASHRAE)

### Chapitre 4

- Tableau 4.1 Propriétés thermophysiques des matériaux de construction pour chaque élément du système
- Tableau 4.2 Zonages climatiques et coordonnées géographiques des trois sites
- Tableau 4.3 Valeurs des résistances thermiques superficielles
- Tableau 4.4 Coefficient de réduction des pertes de chaleur en fonction du coefficient de transmission thermique surfacique et du rapport de surface  $A_{iu} / A_{ue}$

Tableau 4.5	Coefficient de réduction des pertes de chaleur en fonction coefficient de transmission thermique surfacique et du rapport surface $A_{iu} / A_{ue}$
Tableau 4.6	Besoins énergétiques dus à l'enveloppe, les factures correspondantes la subvention de l'état, cas de Tlemcen
Tableau 4.7	Besoins énergétiques dus à l'enveloppe, les factures correspondantes la subvention de l'état, cas d'Alger
Tableau 4.8	Besoins énergétiques dus à l'enveloppe, les factures correspondantes la subvention de l'état, cas de Ghardaïa

## **Chapitre 5**

Tableau 5.1	Les dispositifs climatiques et le degré de rénovation
Tableau 5.2	Valeur de la perméabilité
Tableau 5.3	Diffusion de chaleur par personne
Tableau 5.4	Diffusion de chaleur par l'éclairage et équipements électriques (cas de notre étude)
Tableau 5.5	Consommation moyenne des appareils électriques par jour (cas de notre étude)
Tableau 5.6	Facteurs solaires pour les deux types de vitrages les plus courants
Tableau 5.7	Coordonnées géographiques et classification climatique de Köppen
Tableau 5.8	Energies requises (KWh) dues au scénario d'occupation: Besoins en eau chaude sanitaire, consommation d'énergie électrique et énergie générée par les gains internes.

# **Introduction générale**

## Introduction générale

### 1. Contexte et enjeux

Le monde de l'énergie connaît actuellement une série de chocs économiques et énergétiques, mais également une baisse brutale du prix du pétrole. Selon l'AIE<sup>1</sup>, la demande énergétique mondiale a augmenté à un rythme plus rapide que l'économie mondiale, principalement après la crise économique de 2008. Les changements climatiques planétaires ont placé la protection de l'environnement au premier plan des préoccupations actuelles et constituent, dans une perspective de développement durable, le défi majeur de ce 21<sup>ème</sup> siècle. Dans son troisième rapport d'évaluation, le GIEC<sup>2</sup> prévoit pour 2100 une augmentation de la température de l'air de 1.5 à 6 °C si aucune action de réduction des gaz à effet de serre (GES) n'était entreprise [1]. D'après les experts, on pourrait contenir le réchauffement climatique à moins de 2 °C si les émissions mondiales de GES étaient réduites de moitié d'ici 2050, par rapport à celles de 1990 [2]. L'AIE et le GIEC insistent fortement sur le rôle du secteur du bâtiment qui représente le plus gros potentiel d'atténuation des émissions de GES et par conséquent du changement climatique [3].

Nos modes de consommation de l'énergie ne sont pas durables. L'urgence est donc de mettre en place un modèle de développement profondément différent de celui que nous connaissons jusqu'à présent. Il faut à la fois réduire rapidement les consommations d'énergie et d'aller vers plus de sobriété en mettant en œuvre des stratégies de maîtrise de la demande en énergie, améliorer l'efficacité énergétique en utilisant des systèmes énergétiques à haut rendement et augmenter la part des énergies renouvelables utilisées par la conversion.

Les économies d'énergie sont l'un des axes prioritaires de la transition énergétique. La gestion de l'énergie doit permettre d'améliorer l'efficacité énergétique en réduisant les pertes entre l'énergie primaire et l'énergie finale

---

<sup>1</sup> (AIE) : L'Agence internationale de l'énergie (AIE).

<sup>2</sup> (GIEC) : Groupe Intergouvernemental d'Experts sur le Climat.

qui sera consommée et facturée. Cette gestion doit être pensée au niveau de la production, de la distribution et de l'utilisation terminale de l'énergie [4]. Pour le secteur du bâtiment, cela passe par la construction de bâtiments de plus en plus performants et intégrés à leur environnement, la réhabilitation de l'ensemble du parc bâti et l'intégration massive des énergies renouvelables aussi bien pour la production d'électricité, de chaleur que pour le rafraîchissement et la climatisation. Les bâtiments durables devront avoir d'une part, une efficacité optimale bien au-delà des niveaux actuels, et d'autre part, ils devront tirer profit des énergies renouvelables pour approcher des consommations d'énergie très faibles.

A l'échelle nationale, le bâtiment se manifeste comme secteur prioritaire puisqu'il représente aujourd'hui l'un des principales sources des émissions de gaz à effet de serre. Pour ces raisons, de nombreux efforts de recherche portent sur l'efficacité énergétique des bâtiments et plus précisément sur la réduction de leur consommation énergétique. Cette volonté a conduit à deux voies de recherche distinctes [5]:

- Un axe de recherche centré sur l'amélioration de l'efficacité des équipements énergétiques du bâtiment: il se préoccupe principalement d'améliorer les rendements des systèmes de chauffage et de climatisation afin de diminuer leur facture énergétique primaire.
- Un deuxième axe porte sur l'amélioration de l'enveloppe du bâtiment: en ce qui concerne le développement de solutions d'isolation alternatives à l'isolation classique. Il s'agit notamment de mettre au point des matériaux ayant un fort pouvoir isolant pour une faible épaisseur.

## **2. Etat des recherches**

En accord avec un certain nombre d'experts, la conservation d'énergie à grande échelle conduirait à la réalisation de bâtiments économes en énergie. Ces bâtiments à haute performance réduisent les émissions de gaz à effet de serre et de polluants atmosphériques [6]. En outre, certains documents pertinents ont conduit à un diagnostic approfondi sur les besoins énergétiques pour

maintenir une température confortable. Certains auteurs [7] se sont intéressés à l'étude du confort thermique et de la consommation d'énergie dans un environnement froid. Ils ont opté pour un modèle d'évaluation d'un nouvel indice appelé CEP "Corrective Energy & Power". Dans un autre travail, Hongting et al. [8] ont analysé les principaux facteurs pouvant affecter les caractéristiques de la consommation d'énergie du bâtiment. Les résultats ont conduit à conclure que l'enveloppe du bâtiment, l'éclairage et le système de climatisation sont les principaux facteurs. Dans la littérature, quelques méthodes ont été proposées pour estimer les besoins en énergie de chauffage et de refroidissement. Liu Yang, et al [9] ont utilisé la méthode de la valeur globale du transfert thermique (overall thermal transfer value OTTV) et la méthode des degrés jours (heating degree-days technical) pour l'analyse des besoins de chauffage et de rafraîchissement de l'habitat dans 5 sites de Chine qui représentent les cinq zones climatiques majeures. Dans un autre travail [10], un modèle de bilan énergétique a été proposé, a permis d'estimer les consommations énergétiques mensuelles et annuelles d'un studio de campagne sous des conditions climatiques sahariennes. Les résultats ont indiqué que l'application d'une isolation extérieure entraîne une diminution de 56.05% des charges énergétiques pour une épaisseur de 6 cm. En effet, une autre contribution qui s'est focalisée sur l'impact de l'isolation a été achevée, et elle s'est basée sur un bâtiment situé en France Métropolitaine. Les paramètres simulés sont : la position de l'isolant, son épaisseur (5, 10 et 15 cm) et l'intégralité ou non de l'isolation. Les résultats obtenus montrent que la solution la plus efficace est l'isolation complète [11]. Dans le même contexte, Meral Ozel [12] a consacré une partie de son travail de recherche pour améliorer les propriétés d'isolation thermique en fonction des besoins de refroidissement pendant la période chaude dans la région d'Antalya.

Dans d'autres recherches, Ali-Toudert et al [13] décrivent les principaux résultats obtenus à partir d'une méthode appliquée à l'estimation de la demande énergétique requise d'un bâtiment multizone pour deux régions de régimes climatiques différents, Alger et Ghardaïa. Les résultats indiquent que pour la

maison pilote étudiée, il est possible d'atteindre une réduction de 55% pour le refroidissement et 89% pour le chauffage à Alger. Sous l'influence du climat de Ghardaïa, la consommation énergétique correspond à une économie de 29% pour le refroidissement et de 94% pour le chauffage. L'étude présentée par Filippín et al. [14] est également intéressante, la consommation d'énergie estimée et l'analyse s'appuient sur l'intégration des périodes passées, présentes et futures.

Faisans suite à cette recherche bibliographique, il a été constaté aussi qu'un nombre important d'articles traite le problème de l'efficacité énergétique. Parmi ces derniers, certains se consacrent précisément aux besoins énergétiques totaux (chauffage et refroidissement). Les auteurs ont proposé des démarches qui permettent de réduire sensiblement les coûts énergétiques [15, 16].

### **3. Problématique**

Selon l'Agence internationale de l'énergie (AIE), la consommation d'énergie primaire au niveau national a presque doublé en 2012, cette augmentation est principalement due à l'utilisation des équipements électriques tels que les appareils de chauffage en hiver et les climatiseurs en été [17]. Cependant, la prévision de la consommation d'énergie est un grand défi qui sera liée à plusieurs facteurs, notamment les conditions météorologiques, la structure du bâtiment, la situation géographique, le comportement des occupants et leurs modes de vie, les changements saisonniers, ...etc. Pour faire face, le gouvernement algérien a adopté une série de mesures visant à réaliser des économies d'énergie en mettant en œuvre un plan d'efficacité énergétique dans le secteur du bâtiment. À l'origine, l'étude sera réalisée en calculant le bilan énergétique (besoins annuels en chauffage et en climatisation) d'un immeuble résidentiel type qui ne contient pas de mesures d'efficacité énergétique.

De ce fait, l'objectif visé consiste à évaluer la consommation énergétique potentielle suffisante pour atteindre un niveau de confort approprié dans le cas d'une bonne isolation tout en couvrant les zones climatiques de l'Algérie. Des modèles de prédiction complets seront ensuite abordés, ceci permettra

d'attribuer des étiquettes énergétiques quel que soit le site considéré. L'aspect économique des mesures conceptuelles ont pris une importance majeure dans cette contribution. Un scénario d'occupation "qui se rapproche le maximum vers un cas réel" a été proposé. La spécificité de notre contribution est liée directement à certaines conditions climatiques sévères comme le climat saharien. D'ailleurs, l'unicité et l'atout de cette contribution consistent également à appliquer une méthode spécifique pour classier énergétiquement toutes les types de construction. La combinaison de différentes approches a fourni de nouveaux modèles performants.

#### **4. Structure de la thèse**

La réalisation des études paramétriques n'est pas évidente, notamment lorsque la géométrie du bâtiment existant est complexe ou si le nombre de paramètres à étudier est important. La méthode la plus fiable consiste à fournir une évaluation cohérente des consommations d'énergie d'un immeuble résidentiel type, couvrant toutes les zones climatiques de l'Algérie. Notre approche était basée sur un nouveau modèle pour la prévision des besoins énergétiques. La production de l'eau chaude sanitaire, les apports internes liés à l'éclairage, aux occupants et aux équipements sont pleinement pris en considération.

La thèse est articulée autour de cinq chapitres :

Dans un premier chapitre, on présentera le contexte énergétique et environnemental dans les bâtiments. En effet, le potentiel de réduction de la consommation d'énergie de ce secteur fait de lui une cible privilégiée pour l'amélioration de l'efficacité énergétique. Il constitue donc un moyen pour l'Algérie pour remplir ses engagements pris au niveau international pour la lutte contre le changement climatique.

Dans le deuxième chapitre nous conduisons un travail exploratoire sur les différentes mesures à considérer lors de la conception d'un bâtiment. La phase amont de conception architecturale s'avère être très intéressante lorsque l'on traite des aspects environnementaux de durabilité. De plus, agir dans et sur cette phase permet l'intégration architecturale des concepts bioclimatiques et

l'autoproduction énergétique renouvelable. L'intégration architecturale de ces derniers concepts est alimentée par des informations d'usage et d'appropriation humaine.

Dans le troisième chapitre, nous abordons les concepts et les éléments de la thermique du bâtiment, nous examinons les expressions des bilans globaux d'échange de chaleur en prenant en considération les déperditions par transmissions, par ventilation et les gains internes et solaires.

L'objectif du quatrième chapitre est de faire le point sur la consommation énergétique d'une construction réelle multizone énergivore. Nous voulons avoir une estimation mensuelle et annuelle des besoins en chauffage et en climatisation en kilowattheure et en dinar/m<sup>2</sup>.

Les stratégies d'économie d'énergie sont étudiées en dernier chapitre. Nous allons prouver que l'amélioration de l'efficacité énergétique doit passer d'abord par une enveloppe thermique performante. Ainsi, cette étude se concentre sur une isolation thermique adéquate et un scénario d'occupation raisonnable.

## Références

1. Leroy, L'architecture Ecologique : Développement Durable, Faculté des sciences, Université de La Rochelle 2004-2005.
2. COP21 : Conférence sur le climat de Paris, 30 Novembre - 12 Décembre 2015. <https://univ-droit.fr/la-gazette-juridique/10734-la-conference-sur-le-climat-de-paris-cop21-objectifs-defis-et-enjeux>
3. A. Roetzel, A. Tsangrassoulis, Implication of climate change on comfort and energy Performance in offices, *Building and Environment*, 57: 349–361, 2012.
4. Maîtriser la demande en énergie et promouvoir l'efficacité énergétique: Ministère de l'environnement, de l'énergie et de la mer. <http://www.developpement-durable.gouv.fr/les-enjeux-de-la-transition.html>
5. L. Chesné, Vers une nouvelle méthodologie de conception des bâtiments basée sur leurs performances bioclimatiques, thèse de doctorat, Centre de Thermique de Lyon, 2012.
6. S. Semahi, Contribution méthodologique a la conception des logements à haute performance énergétique (HPE) en Algérie, Développement d'une approche de conception dans les zones arides et semi-arides, Mémoire de Magister, École Polytechniques d'Architecture et d'Urbanisme EPAU, Alger, 2013.
7. Y. He, N. Li, L. Zhou, K. Wang, W. Zhang, Thermal comfort and energy consumption in cold environment with retrofitted Huotong (warm-barrel), *Building and Environment* 112 (2017) 285-295.

8. H. Ma, N. Du, S. Yu, W. Lu, Z. Zhang, N. Deng, C. Li, Analysis of typical public building energy consumption in northern China, *Energy and Buildings* 136 (2017) 139–150.
9. L. Yang, C.L. Joseph, C.L. Tsang, Energy performance of building envelopes in different climate zones in China, *Applied Energy* 85(2008) 800-817.
10. S. Belgherras , S.M.A. Bekkouche , T. Benouaz , N. Benamrane , Prospective analysis of the energy efficiency in a farm studio under Saharan weather conditions (2017), Elsevier, *Energy and Buildings*, 145, pp.342-353. DOI: 10.1016/j.enbuild.2017.04.030
11. E. Stéphan, R. Cantin, P. Michel, A. Caucheteux et S. Tasca-Guernouti, Évaluation de l'impact d'une isolation thermique sur le confort d'été et les besoins énergétiques d'un bâtiment ancien, chez XXXe Rencontres AUGC-IBPSA, Chambéry, 2012.
12. M. Ozel, Determination of optimum insulation thickness based on cooling transmission load for building walls in a hot climate, *Energy Conversion and Management* 66 (2013) 106–114.
13. F. Ali-Toudert, J. Weidhaus, Numerical assessment and optimization of a low-energy residential building for Mediterranean and Saharan climates using a pilot project in Algeria, *Renewable Energy* 101 (2017) 327-346.
14. C. Filippín, F. Ricard, S.F. Larsen, M. Santamouris, Retrospective analysis of the energy consumption of single-family dwellings in central Argentina, *Retrofitting and adaptation to the climate change*, *Renewable Energy* 101 (2017) 1226-1241.
15. X. Lü, T. Lu, C J. Kibert, M. Viljanen, Modeling and forecasting energy consumption for heterogeneous buildings using a physical - statistical approach, *Applied Energy* 144 (2015) 261–275.
16. Z. Fang, N. Li, B. Li, G. Luod, Y. Huang, The effect of building envelope insulation on cooling energy consumption in summer *Energy and Buildings* 77 (2014) 197–205.
17. I. Tibermacine, L'impact de la typologie des habitats collectifs sur les conditions thermiques intérieures et l'efficacité énergétique, Cas de climat chaud et sec, Mémoire de Magister, Université Mohamed Khider Biskra, 2016.

# **Chapitre 1**

## **Problématiques Energétiques, Environnementales et Evolution du Secteur du Bâtiment**

# 1 . Problématiques Energétiques, Environnementales et Evolution du Secteur du Bâtiment

"Nous devons effectuer une révolution mondiale dans le domaine de l'énergie, consistant en une amélioration de l'efficacité énergétique et l'augmentation de la mise en œuvre d'énergies pauvres en carbone", a déclaré Nobuo Tanaka, directeur exécutif de l'Agence Internationale de l'Energie (AIE) à Londres à l'occasion de la présentation du " World Energy Outlook (WEO) 2008 ".

## 1.1. Introduction

La consommation d'énergie a commencé à croître beaucoup au 19ème siècle avec l'exploitation du charbon, elle s'est considérablement amplifiée au 20ème siècle avec le pétrole et le gaz. Cette augmentation de consommation d'énergie primaire a été accompagnée par des impacts négatifs sur l'environnement. A cet effet, des réflexions et des engagements ont été pris à l'échelle internationale par la signature de certains protocoles comme celui de Kyoto en 1997 ou la COP21<sup>1</sup> organisée à Paris en 2015.

Le secteur du bâtiment est considéré comme étant le mieux placé pour offrir des possibilités de progrès suffisamment fortes pour répondre à ces engagements. Il se positionne comme un élément clé pour faire face aux enjeux du développement durable.

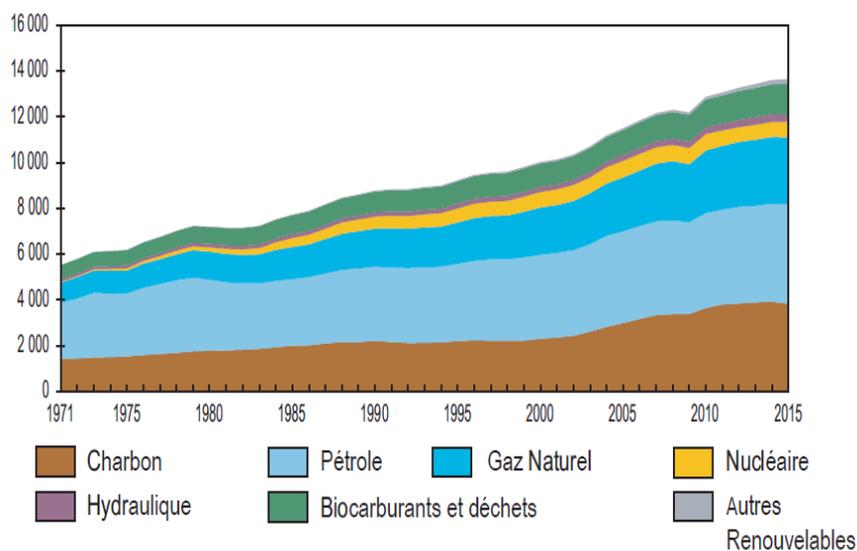
Ce chapitre introductif présente donc le contexte général dans lequel s'inscrit le travail de cette thèse. Il est présenté de façon à faire le lien entre les problèmes énergétiques, économiques et environnementaux d'une part et le secteur du bâtiment d'autre part, que ce soit à l'échelle mondiale, régionale (pays de la méditerranée) où se situe la zone climatique qui font l'objet de notre étude.

---

<sup>1</sup> La Conférence de Paris de 2015 sur le climat a eu lieu du 30 Novembre au 12 Décembre 2015 au Bourget en France.

## 1.2. Le contexte énergétique au niveau mondial

Selon l'agence internationale de l'énergie (IEA, 2017), la demande énergétique mondiale a connu une croissance soutenue, sur les 40 dernières années, passant de près de 6106 Mtep en 1973 à 13 647 Mtep, en 2015 (Figure 1.1.). Elle a été multipliée par plus de 2.4 en 40 ans, ce qui correspond à un rythme de croissance annuelle moyen de l'ordre de 2.24 %. Cette tendance, si elle devait se prolonger sur les prochaines années, conduirait à plus que doubler la demande énergétique mondiale à l'horizon 2050 par rapport au niveau de l'année 2010 [2]. Le taux de consommation diffère d'un pays à un autre, il est déterminé par les conditions climatiques, le taux de croissance économique et le développement technologique.



**Figure 1.1.** Evolution de la consommation mondiale en énergie primaire en Mtep (IEA, 2017) [1].

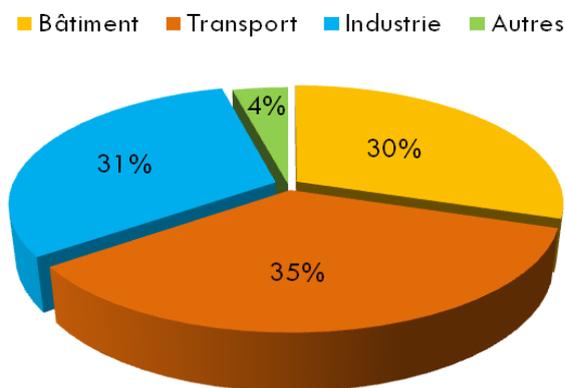
La croissance de la demande énergétique est la principale cause du trop lent renouvellement des méthodes de production et de consommation des énergies. Les principaux pays pointés du doigt sont la Chine (ayant dépassé les États-Unis en 2009 comme plus grand consommateur énergétique du monde) et l'Inde, en pleine

émergence. Les combustibles fossiles représentent en effet pour ces pays plus de la moitié de l'augmentation de la demande en énergie primaire [3].

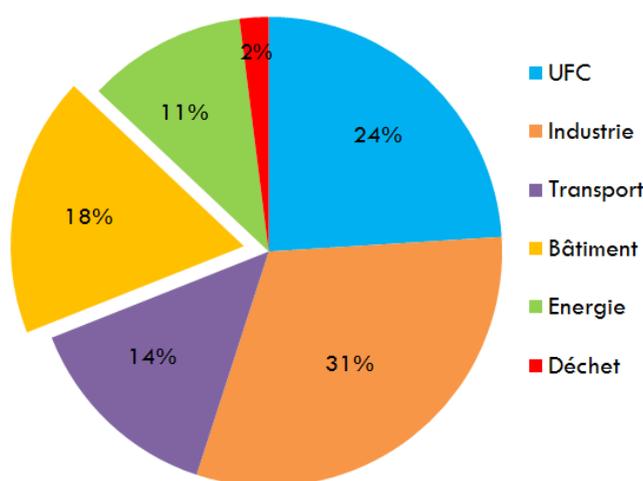
L'un des enjeux cruciaux au niveau mondial est de réussir à faire que les pays en développement réalisent leur rattrapage économique avec l'intensité carbone ( $\text{CO}_2/\text{PIB}$ ) la plus faible possible, en ne reproduisant pas les erreurs faites par les pays industrialisés. C'est un défi de taille qui implique des efforts très importants en termes d'amélioration de l'efficacité énergétique.

Selon le rapport WEO-2008 [4], d'ici 2030, l'efficacité énergétique devrait représenter plus de 50 % des réductions d'émissions de  $\text{CO}_2$  liées au secteur de l'énergie. La prépondérance de l'amélioration de l'EE comme levier d'atténuation des émissions de GES s'explique principalement par le fait que ces technologies sont pour la plupart déjà disponibles et comparativement moins coûteuses que les technologies de "décarbonisation".

Dans un nouveau contexte énergétique mondial caractérisé par des fortes contraintes de réduction des émissions en gaz à effet de serre, des résolutions importantes ont été prises dans les différents secteurs énergivores. Le secteur du bâtiment est, parmi les secteurs économiques, le plus gros consommateur mondial en énergie, représente une charge importante autour de 30% de la consommation d'énergie finale devant l'industrie et le transport qui consomment respectivement 31% et 35% de la consommation d'énergie finale (figure 1.2.). Il est aussi responsable d'un cinquième des émissions de gaz à effet de serre dans le monde. Il est classé devant le secteur de transport (14%), le secteur de l'énergie (11%) et le secteur de traitement des déchets (2%). L'industrie reste le secteur le plus émetteur de gaz à effet de serre (31%) suivi du secteur d'UTCF (Utilisation des Terres, leurs Changements et la Forêt) qui est responsable de (24%) (figure 1.3.).



**Figure 1.2.** Consommation d'énergie finale par secteur dans le monde en 2014 (IEA, 2017) [1].



**Figure 1.3.** Répartition des émissions mondiales de GES par secteur en 2014 [5].

La consommation d'électricité dans le secteur du bâtiment représente 53 % de la consommation totale d'électricité au monde [1]. Cependant il constitue une cible privilégiée des politiques d'efficacité énergétique, rendues indispensables à toutes les économies compte tenu des contraintes liées à la sécurité d'approvisionnement énergétique et aux changements climatiques.

### 1.3. Le contexte énergétique à l'échelle régionale (région méditerranéenne)

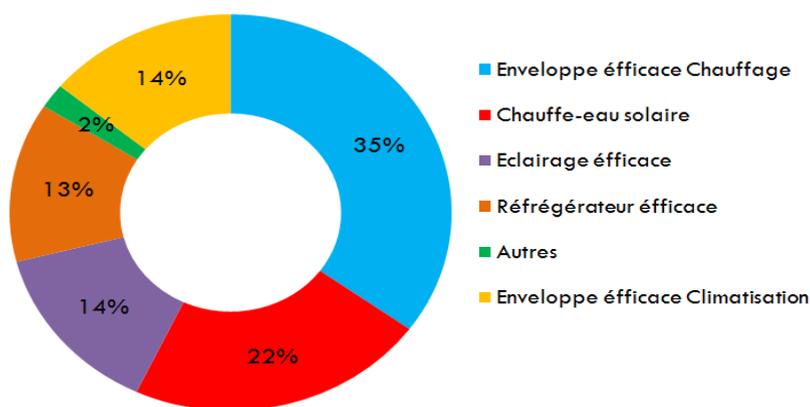
En ce qui concerne les pays méditerranéens, qui regroupent les pays du nord de la Méditerranée (PNM)<sup>2</sup> et les pays du sud et de l'est de la Méditerranée

<sup>2</sup> Les PNM regroupent : l'Albanie, la Bosnie-Herzégovine, Chypre, l'Espagne, la France, la Grèce, la Croatie, l'Italie, Monaco, Monténégro, Malte et la Slovénie.

(PSEM)<sup>3</sup>, situés dans une zone considérée comme un véritable "hot spot" du changement climatique, la nécessaire action est d'autant plus urgente. Cette zone est soumise à une forte augmentation de la demande en énergie primaire qui devrait être multipliée par 1.5 d'ici 2030. Cette demande dans les PSEM devrait croître 4 à 5 fois plus rapidement que celle des pays de la rive nord jusqu'à représenter en 2030 plus de 42 % de la demande d'énergie du bassin méditerranéen contre 30 % en 2007<sup>4</sup> [6].

Le secteur du bâtiment représente environ 38 % de l'énergie finale consommée (ce pourcentage varie entre 27 et 65 % dans les PSEM) et 21 % dans les PNM.

Face à cette inégale répartition des ressources, et pour anticiper au plus tôt une inexorable amplification des tensions énergétiques, il devient essentiel pour les PSEM d'intégrer dès à présent les notions d'efficacité énergétique et de maîtrise des consommations tout en continuant à développer les différentes énergies renouvelables. Des projets pilotes ont montré qu'avec un surcoût de 10 à 25 % à la construction, jusque 60 % d'économies d'énergie pouvaient être réalisées. Ce potentiel peut être atteint à travers le regroupement de plusieurs mesures, comme le montre la figure 1.4 issue d'une étude réalisée par Plan Bleu en 2009.



**Figure 1.4.** Structure du potentiel d'efficacité énergétique dans la région de la Méditerranée du sud sur la période 2010-2030 [6].

<sup>3</sup> Les PSEM regroupent : le Maroc, l'Algérie, la Libye, la Tunisie, l'Égypte, la Jordanie, Palestine, le Liban, la Syrie et la Turquie.

<sup>4</sup> Source : Plan Bleu 2009, Infrastructures et Développement énergétique durable en Méditerranée : Perspectives 2025.

Notons que la mesure de l'amélioration des performances thermiques de l'enveloppe des bâtiments couvre 50% de ce potentiel, grâce aux économies d'énergie qu'elle implique pour les besoins de chauffage et de climatisation [7,8]. Il en découle l'importance des mesures réglementaires relatives aux performances thermiques des bâtiments et à l'intérêt des techniques innovantes de construction en choisissant, voire élaborer, de nouveaux matériaux.

#### **1.4. Politique énergétique dans le secteur de bâtiment en Algérie**

L'Algérie ne fait pas exception à ce schéma exponentiel, le secteur du bâtiment (résidentiel et tertiaire) étant responsable de 36 % de la consommation énergétique nationale finale (figure 1.5.), et représente un taux de croissance annuel estimé à 7.3 % [9,10]. Pour faire face, la nouvelle vision doit se basée sur la rationalisation de la consommation énergétique dans cet important secteur. Par conséquent, l'augmentation de l'efficacité énergétique, l'intégration des énergies renouvelables et l'atténuation des impacts climatiques, par la réduction des émissions de gaz à effet de serre, représentent les principaux défis à relever d'autant que le secteur du bâtiment dispose d'un grand potentiel d'économie pour contribuer à cet objectif. Ce secteur peut favoriser une économie d'énergie de 30 à 40%. Les actions menées au niveau national ont touché 600 logements pour une période allant du 2010 au 2014<sup>5</sup>, un programme de 3000 logements à efficacité énergétique et de rénovation thermique pour 4000 logements anciens, est lancé par le Ministère de l'Habitat en partenariat avec l'APRUE. 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 a fallut aussi favoriser l'utilisation massive des équipements et appareils performants. Plus de 5 millions de lampes à basse consommation sont disponibles

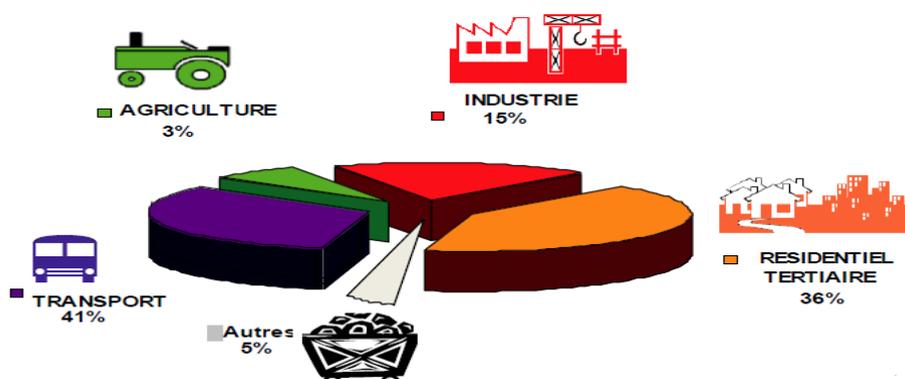
---

<sup>5</sup> Chiffres relatifs au programme quinquennal 2010-2014 de maîtrise d'énergie.

sur le marché local. L'état s'est engagé aussi à l'installation de 10000 chauffe-eau solaires avec environ 22.000 m<sup>2</sup> de capteurs solaires collectifs. L'objectif étant d'améliorer le confort intérieur et améliorer l'efficacité énergétique 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<sup>6</sup> qui seront économisées, d'ici 2030 répartie comme suit <sup>7</sup> :

- Isolation thermique : l'objectif est d'atteindre un gain cumulé évalué à plus de 7 millions de TEP,
- Chauffe-eau solaire : l'objectif est de réaliser une économie d'énergie à plus de 2 millions de TEP,
- Lampe basse consommation (LBC) : les gains en énergie escomptés, à l'horizon 2030 sont estimés à près de 20 millions de TEP,
- Eclairage public : l'objectif est de réaliser une économie d'énergie de près de un (01) million de TEP, à l'horizon 2030 et d'alléger la facture énergétique des collectivités.



**Figure 1.5.** Répartition de la consommation finale par secteur d'activité (Chiffres clés Année 2015), APRUE [10].

<sup>6</sup> TEP : Unité de mesure de l'énergie, Elle vaut, selon les conventions, 41,868 GJ, ce qui correspond au pouvoir calorifique d'une tonne de pétrole "moyenne".

<sup>7</sup> Programme National de l'Efficacité Énergétique, Ministère de l'Énergie et des Mines.

Le parc de logements existants en Algérie est considérable, les pouvoirs publics Algériens ont lancé de vastes programmes de construction ; 03 millions de logements sur 15 ans<sup>8</sup>. Pour le prochain quinquennat 2015-2019, le ministère de l'Habitat, de l'Urbanisme et de la Ville prévoit, la réalisation de 1.6 million d'unités de logement de différentes formules dans le cadre d'un plan d'investissement d'une valeur de 4.500 milliards de DA (soit l'équivalent 56 milliards de dollars) [11]. La construction de logements est devenue un axe prioritaire de la politique de développement du pays. Dans un tel contexte, le pouvoir public est davantage sensible au souci de rapidité qu'à celui d'efficacité énergétique. Ainsi, la volonté de la part des autorités d'une construction rapide et au moindre coût constitue un obstacle important à la mise en place d'une politique d'efficacité énergétique dans l'habitat [12].

L'Algérie est l'un des pays du Maghreb qui a réalisé une réglementation thermique à usage d'habitation en 1997, et qui est devenue obligatoire à partir de 2000. L'objectif était de réduire la consommation de chauffage de l'ordre de 25%. Une réflexion a été engagée ensuite pour porter ce niveau d'économie à plus de 40%. Pour ce faire, des travaux de recherche, menés au CNERIB "Centre National d'Etudes et de Recherches Intégrées du Bâtiment", ont permis l'élaboration et l'adoption de deux Documents Techniques Réglementaires, DTR C 3-2 "Réglementation Thermique des Bâtiments d'Habitation - Règles de Calcul des Déperditions Calorifiques", "Fascicule 1" et DTR C 3-4, "Règles de Calcul des Apports Calorifiques des Bâtiments (Climatisation) ", "Fascicule 2", [13,14]. Les règles de calcul des déperditions calorifiques définissent les performances thermiques minima mais comprennent aussi des conventions de calcul ainsi que des conventions de dimensionnement des installations de chauffage. La réglementation algérienne autorise, dans certaines limites, le calcul informatisé des besoins de chauffage. Ceci est un point positif puisque cela permet de profiter de l'inertie

---

<sup>8</sup> (Ministère de l'habitat et de l'urbanisme, La Revue de l'Habitat, n° 6, janvier 2011).

thermique d'un bâtiment ce qui est un facteur très important étant donné le type de climat et les différents types de constructions existantes en Algérie [13].

Le climat de l'Algérie, confère une variabilité climatique particulière, allant de la plus aride à la plus humide. C'est pourquoi, le territoire Algérien a été subdivisé en quatre zones climatiques, selon le critère du nombre de degrés jours d'hiver (pour le chauffage) et le nombre de degrés jours d'été (pour la climatisation). La répartition de ces zones est effectuée conformément à un découpage national des zones climatologiques suivantes :

- La zone A : comprend le rivage de la mer et parfois le versant Nord des chaînes côtières,
- La zone B : comprend la plaine derrière le rivage de la mer et les vallées entre les chaînes côtières et l'atlas tellien; au sein de cette zone, on distingue une sous-zone B' qui comprend la vallée du Chélif.
- La zone C : comprend les Hauts-Plateaux compris entre l'atlas tellien et l'atlas Saharien.
- La zone D : comprend le Sahara, au sein de laquelle on distingue une sous-zone D' qui comprend le Sahara au-delà de la latitude 31° jusqu'aux frontières Sud.

La figure 1.6 présente la carte représentant le zonage climatique adopté par la réglementation thermique (D.T.R. C 3-2).

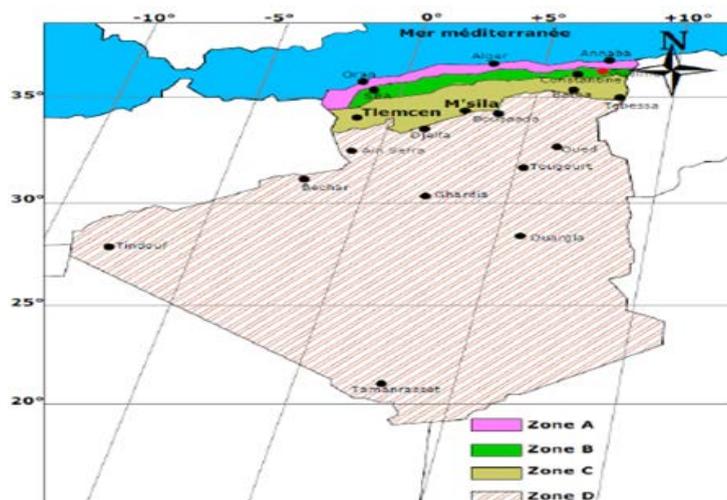


Figure 1.6. Zones climatiques adoptées par la réglementation thermique Algérienne [13].

Zone	DJU Chauf	NJ Chauf	Jan.	Fév.	Mars	Avril	Mai	Juin	Juil	Aout	Sep.	Oct.	Nov.	Déc.
A	769	90	11.1	11.8	13.3	15.5	18.4	21.8	25.0	25.8	23.4	19.4	15.3	12.1
B	1409	120	7.1	7.8	10.0	12.9	16.6	21.2	25.2	25.3	21.7	16.3	11.5	7.6
C	1026	90	7.4	8.9	11.7	15.3	19.6	24.5	27.4	27.9	23.7	17.7	12.2	8.2
D1	365	30	11.2	15.7	17.1	21.5	26.2	30.5	31.8	31.6	28.1	22.3	16.3	11.8
D2	447	59	12.9	16.0	17.9	21.6	25.8	30.6	33.5	34.5	28.9	23.1	17.2	12.0

**Tableau 1.1.** Récapitulatif des températures moyennes et des DJU de chauffage par zone<sup>9</sup> [15]

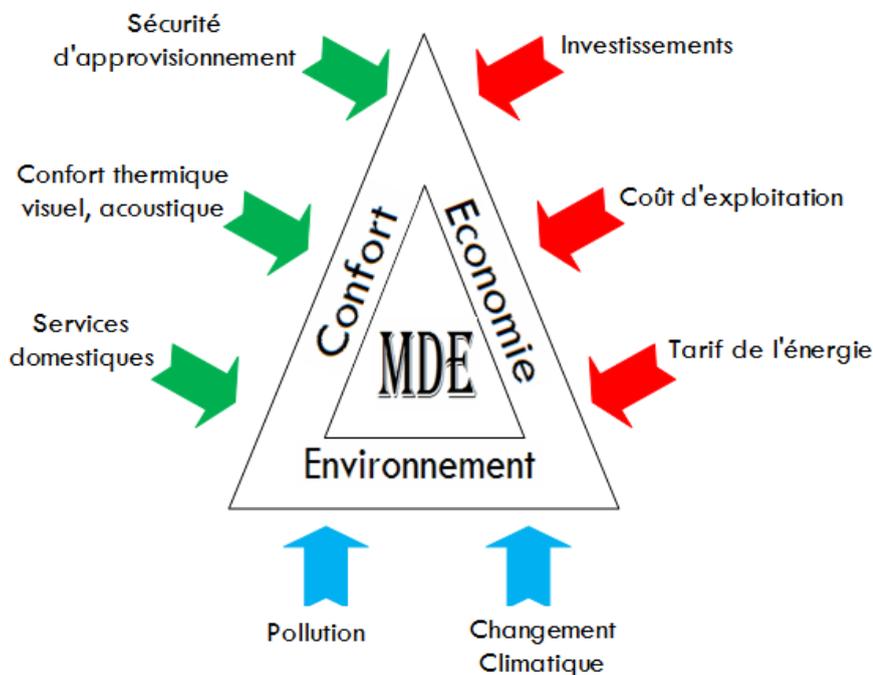
### 1.5. Optimisation de la gestion des flux énergétiques

La maîtrise de l'énergie au sens large est un problème de gestion de flux qu'ils soient énergétiques soient informatiques. Cette gestion doit être pensée au niveau de la production, de la distribution et de l'utilisation terminale de l'énergie en coordination avec les informations sur la fluctuation du tarif de l'énergie, et les données météorologiques. La gestion des flux énergétiques dans le bâtiment vise à satisfaire plusieurs besoins, que l'on peut diviser en trois catégories principales présentées sur la figure 1.7 [16] :

- Besoins de confort de l'utilisateur qui consistent à réaliser un ensemble de fonctions énergétiques dans le bâtiment pour satisfaire la demande de l'utilisateur. Le système de gestion de flux énergétique dans le bâtiment doit garantir au minimum la sécurité d'approvisionnement en ressource ou une partie essentielle des besoins qui peuvent être caractérisés par des critères de confort (thermique, visuel, acoustique).
- Besoins économiques et financiers qui correspondent aux coûts d'investissement et de fonctionnement du système. Ces critères sont fortement tributaires du coût d'achat et de rachat de l'énergie mais aussi de l'investissement des appareils.

<sup>9</sup>Source : Données Météo, Algérie

- Besoins environnementaux qui correspondent à la réduction de la pollution et au respect des contraintes écologiques liées aux émissions de gaz à effet de serre. Le développement durable doit se baser sur la responsabilité de chacun. On peut ainsi imaginer par l'application du protocole de Kyoto, un quota sur les émissions de gaz polluants pour chaque bâtiment, ou bien un système de certificats d'utilisation de l'énergie propre pour chaque bâtiment.



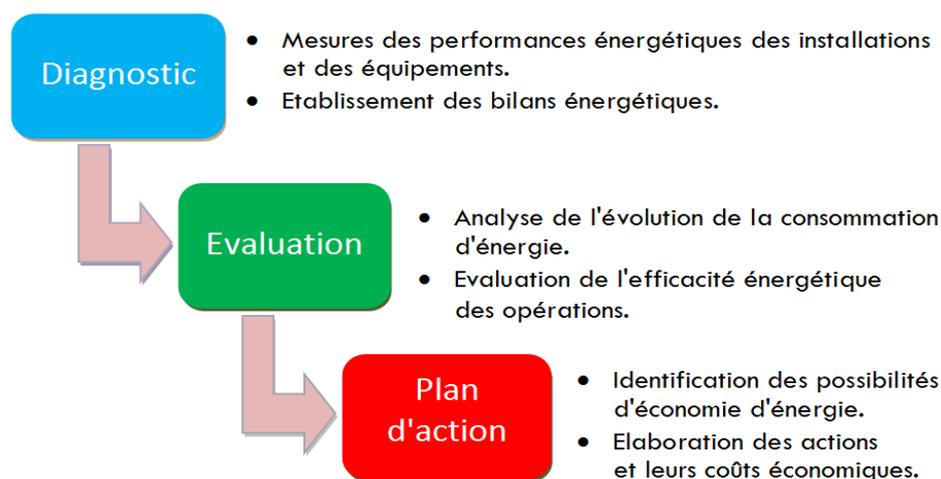
**Figure 1.7.** Les trois critères de la maîtrise de l'énergie (MDE) [16].

La loi algérienne sur la maîtrise de l'énergie, en tant que loi cadre, se distingue surtout par l'énoncé du principe d'introduction de réglementations spécifiques qui établiront des exigences et des normes nationales d'efficacité énergétique appliquées aux bâtiments neufs et aux appareils . Un contrôle de conformité devra inciter à promouvoir les équipements à haut rendement énergétique. Les équipements "énergivores" neufs mis sur le marché seront frappés de taxes spécifiques et les équipements usagés non conformes sont interdits à l'importation. Ce système de contrôle et de sanction traduit le caractère triplement protecteur de loi relative à la maîtrise de l'énergie : protection du consommateur, protection de l'environnement, protection de l'économie nationale. La loi instaure également

un système d'audit énergétique auprès d'établissements grands consommateurs d'énergie [17,18].

### 1.5.1 L'audit énergétique

La question de la consommation d'énergie a pris de plus en plus d'importance dans tous les secteurs non seulement à cause de l'impact immédiat sur les coûts de production mais parce que les conséquences sur l'environnement sont considérables. C'est pourquoi l'audit énergétique demeure un élément central de toute stratégie de gestion énergétique efficace. Plus détaillé que le Diagnostic de Performance Énergétique "DPE", l'audit énergétique d'un bâtiment tient compte de nombreux critères à commencer par l'isolation thermique du bâtiment. Une construction mal isolée consommera plus d'énergie notamment en hiver pour pouvoir maintenir la température ambiante à un niveau acceptable et agréable. Il sera alors indispensable de repérer les zones de déperdition de la chaleur pour envisager une meilleure isolation. L'analyse comprend également la production d'eau chaude sanitaire "ECS", le système de ventilation, l'éclairage, le chauffage ainsi que la consommation domestique de manière générale. L'audit énergétique consiste à effectuer les tâches indiquées sur le diagramme donné par la figure 1.8 :



**Figure 1.8.** Les grandes étapes de l'audit énergétique.

## 1.6. Performance énergétique du bâtiment

La performance énergétique est évaluée en fonction de la quantité d'énergie primaire nécessaire pour répondre aux besoins principaux du bâtiment (le chauffage, la climatisation, la ventilation et l'éclairage). Dans le domaine de l'efficacité énergétique des bâtiments, on distingue deux niveaux de performance. On parle de construction basse énergie (ou basse consommation) pour des besoins de chauffage de 30 à 60 kWh/(m<sup>2</sup> an). Pour parler de bâtiment très basse énergie (ou très basse consommation ou encore passif), il faut satisfaire un critère de besoin de chauffage de 10 à 15 kWh/(m<sup>2</sup> an). Dans ce deuxième type d'habitation, il n'est plus nécessaire de mettre en place un système de chauffage conventionnel. Le graphe ci-dessous aide à comprendre la raison à la quelle ces deux catégories sont intéressantes.

On se rend donc compte grâce à ce graphique qu'il existe deux optima économiques : le premier pour une consommation de l'ordre de 40 kWh/(m<sup>2</sup> an) et le second pour une consommation de l'ordre de 15 kWh/(m<sup>2</sup> an). Ces deux optima correspondent aux bâtiments basse et très basse énergie. Notons que la puissance maximale demandée pour une maison très basse consommation de 150 m<sup>2</sup> est de 1500 W, ce qui est la puissance d'un petit sèche-cheveux.

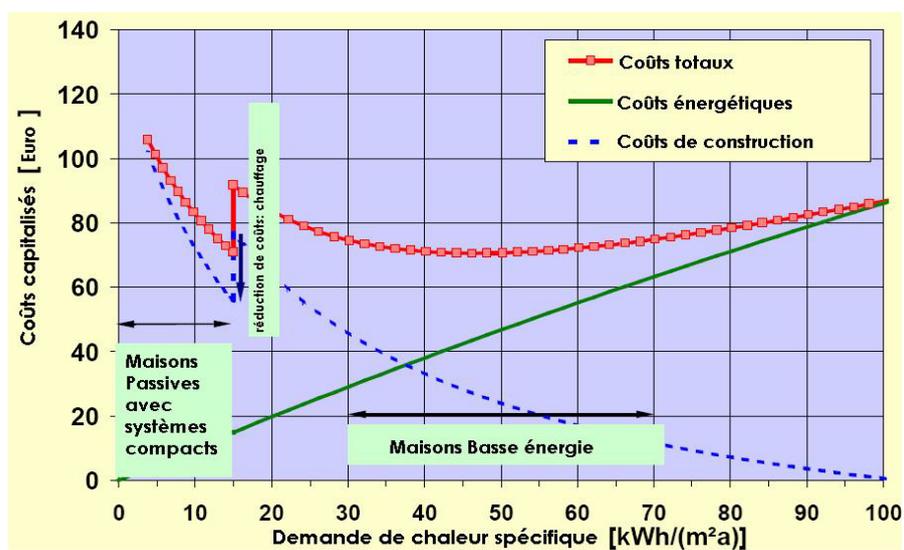


Figure 1.9. Coût global de l'énergie dans un bâtiment, RT 2012, Bâtiments passifs [19].

Les bâtiments du futur devront être peu consommateurs d'énergie, voire autonomes énergétiquement. A l'échelle international "KYOTO 1997", la France par exemple a mis en place des normes sous forme de réglementations thermiques imposant l'utilisation d'une isolation thermique performante pour les maisons neuves ou en rénovation et qui respectent le Grenelle de l'environnement. Ces séries de réglementations thermiques (RT2000, RT2005, RT2012) sont de plus en plus exigeantes au fil du temps. Les exigences sont passées d'une moyenne de 150 kWh/(m<sup>2</sup> an) dans la RT 2005 à 50 kWh/(m<sup>2</sup> an) pour la RT 2012 [20] (figure 1.10). L'évolution croissante de ces exigences a pour but d'atteindre des conditions environnementales confortables à moindre consommation d'énergie.

Pour atteindre le niveau énergétique des BBC, la nouvelle [RT 2012] a imposé 3 principales exigences dans les maisons neuves [20,22] :

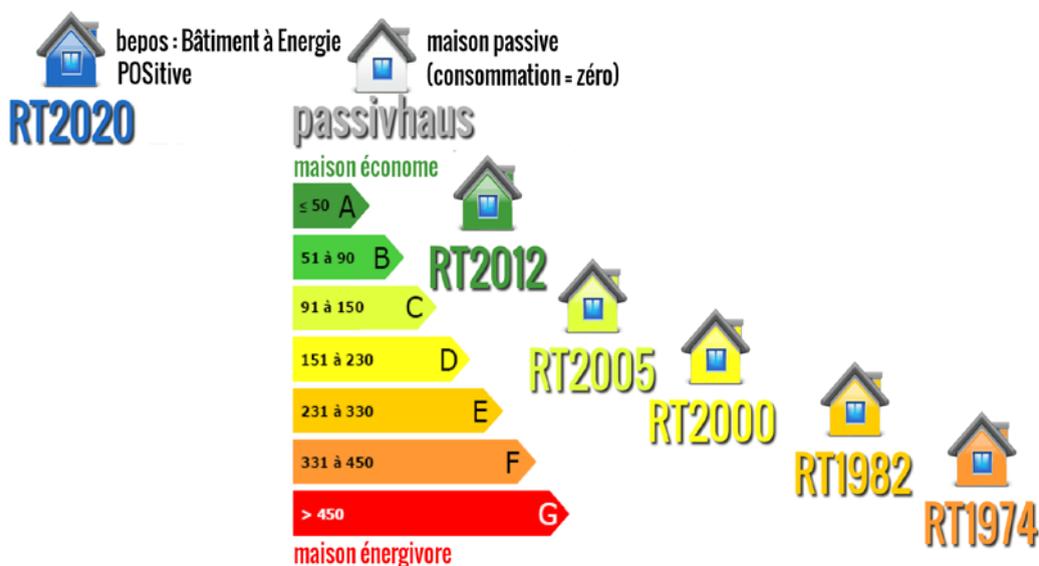


Figure 1.10. Réglementation thermique et évolutions successives [21].

### Le besoin bioclimatique (Bbio)

C'est un critère lié aux composantes de la conception du bâtiment (typologie, localisation, altitude...) sans tenir compte de ces systèmes énergétiques installés. Il s'agit ici de vérifier l'optimisation de l'inertie et de l'isolation du bâti pour réduire ses déperditions thermiques en utilisant des matériaux performants (tels que la

mousse de polyuréthane, les laines de verres ou le polystyrène) et aussi des techniques de mieux en mieux adaptées (telles que le double vitrage et la réduction des ponts thermiques). L'architecture de ces bâtiments est aussi étudiée de manière à assurer un apport passif maximal en hiver essentiellement des apports solaires à travers l'augmentation des surfaces vitrées et l'étude de leurs orientations.

### **La consommation d'énergie primaire (Cep)**

Ce critère est lié à la consommation en énergie primaire des principaux usages: chauffage, refroidissement, éclairage, production d'eau chaude sanitaire et auxiliaires (pompes, ventilateurs...). Ceci exige l'intégration des systèmes énergétiques performants tels que la ventilation double flux, chaudière à condensation, chauffage thermodynamique (pompe à chaleur)... et aussi l'utilisation des énergies renouvelables comme les panneaux solaires photovoltaïques.

### **Le confort d'été (Tic : température intérieure conventionnelle)**

Il s'agit de vérifier l'aptitude du bâtiment à garantir un bon niveau de confort et de température en été sans recourir à des systèmes de refroidissement introduisant des consommations supplémentaires. Ce niveau de confort peut être assuré à travers la protection des locaux du soleil l'été (masques végétaux et protections solaires amovibles), un rafraîchissement optimisé (ventilation nocturne, brassage d'air), un décalage des pics de température (inertie du bâtiment), et aussi une prise en compte de la contribution des apports internes provoquant une élévation des températures que l'on essaiera de les minimiser. La RT 2012 constitue une réelle adaptation de la conception face aux exigences de performance énergétique globale du bâtiment. Au sein d'un bâtiment, deux types de leviers complémentaires peuvent être activés [4] :

- L'efficacité énergétique passive qui vise à éviter les déperditions en renforçant la performance thermique du bâtiment (isolation, parois vitrées)

- L'efficacité énergétique active qui vise à réduire les consommations d'énergie en optimisant le fonctionnement des équipements et des systèmes.

Pendant plusieurs années, les concepteurs et les scientifiques ont cherché principalement à réduire la consommation énergétique pendant la phase d'exploitation du bâtiment (efficacité active), car ils ont estimé que 80 à 85% de la consommation d'énergie totale survenait pendant cette phase [23]. De ce fait, une attention particulière fut portée sur la conception et l'optimisation des systèmes de chauffage et de refroidissement, alors que l'énergie grise (efficacité passive) recevait moins d'attention. Néanmoins, on s'est vite rendu compte que pour exploiter pleinement et durablement les gisements d'économie d'énergie, les actions de maîtrise de l'énergie devraient concerner non seulement l'utilisation efficace des systèmes énergétiques, mais aussi la conception/rénovation de l'enveloppe des bâtis. Un constat qui est d'autant plus important lorsqu'on sait que contrairement aux autres secteurs, le taux de renouvellement du parc immobilier existant est très faible (moins de 1% par an) et donc plus de la moitié des bâtiments qui existeront en 2050 sont déjà construits. La rénovation est donc la seule réponse à apporter pour améliorer les performances énergétiques des bâtiments existants [4].

### **1.7. Stratégies d'amélioration des performances énergétiques du bâtiment**

Pour obtenir un bâtiment peu énergivore, on cherche d'abord à réduire les besoins énergétiques (étape 1). Cela peut être réalisé grâce à une bonne qualité thermique de l'enveloppe du bâtiment et en utilisant le soleil. Des sources d'énergie renouvelables sont autant que possible utilisées (étape 2), et ce, par exemple en produisant les besoins électriques à l'aide de panneaux photovoltaïques, en produisant l'eau chaude à l'aide des chauffe-eau solaires ou en utilisant la chaleur des eaux souterraines ou du sol pour le chauffage. Les besoins énergétiques restants qui ne sont pas assurés par l'étape 2 doivent être produits le plus efficacement possible (étape 3), c'est le principe de Trias

Energetica [24]. Les étapes sont illustrées schématiquement conformément à la figure 1.11.

- **Minimiser la demande en énergie** : mesures d'isolation, techniques d'éclairage de jour, utilisation de l'énergie solaire, passive, refroidissement nocturne, limiter les besoins, choix de la localisation limitant les déplacements (les noyaux d'habitat).
- **Utiliser au mieux les sources disponibles d'énergie renouvelable**: solaire photovoltaïque, solaire thermique, pompes à chaleur, chauffage au bois, petit éolien (pour de bonnes conditions.
- **Recourir à des systèmes énergétiques performants**: chaudières à haut rendement, distribution de chaleur efficiente, appareils électriques efficients (y compris éclairage).



**Figure 1.11.** Principe Trias Energetica [25].

La notion d'éco-construction a commencé à apparaître dans la lecture générale. Elle correspond à la nécessité de préserver les ressources énergétiques en matières premières, à lutter contre le changement climatique et à assurer une qualité environnementale et sanitaire des produits de construction. Les contextes énergétiques et environnementales actuels rendent nécessaire la réduction de la consommation en énergie primaire des secteurs énergivores tels que le secteur du bâtiment. Pour y parvenir, plusieurs études se sont penchées sur la réduction des besoins de chauffage et de climatisation [26]. Ceci vise à orienter la conception

architecturale à ses phases amont vers des stratégies d'optimisation du confort d'intérieur des bâtiments de manière naturelle par des procédés purement architecturaux et techniques passives.

### **1.8. Caractérisation des besoins énergétiques dans le bâtiment**

En général, un bâtiment est constitué de plusieurs fonctions énergétiques et d'équipements. Angioletti et Despretz [27,16] ont classé les charges énergétiques des bâtiments en deux catégories principales :

- Les fonctions générales, qui correspondent à 80% de la consommation totale, ont les caractéristiques suivantes :
  - ✓ Elles consomment une grande quantité d'énergie, elles sont présentées habituellement dans plusieurs types de bâtiment différents.
  - ✓ Elles correspondent aux besoins essentiels des usagers. Elles sont constituées des systèmes de chauffage, de climatisation, de ventilation, d'éclairage et d'eau chaude sanitaire.
- Les fonctions spécifiques ou auxiliaires comme la cuisson, la production de froid (congélateur) et les services électroménagers. Ces fonctions correspondent à des besoins spécifiques de l'utilisateur.

#### **1.8.1. Méthodes passives pour la réduction des besoins en chauffage**

Pour réduire la consommation énergétique d'un bâtiment, il faut penser à une approche bioclimatique qui doit être suivie afin de favoriser les apports solaires passifs nécessaires à la réduction des besoins de chauffage. Les apports solaires peuvent couvrir une part importante des besoins de chauffage. Les fenêtres / lanterneaux à haute performance thermique avec une surface appropriée et orientée au plein-soleil peuvent donc être une solution intéressante. De plus, l'éclairage zénithal permet de réduire la consommation énergétique pour l'éclairage. D'autre part, les apports internes jouent également un rôle non négligeable sur les besoins de chauffage. En ce qui concerne les déperditions

thermiques, les facteurs contributifs doivent être limités afin de minimiser les pertes de chaleur: l'enveloppe, les ponts thermiques, les infiltrations, la ventilation, etc. Les solutions passives pour réduire les consommations induites par le chauffage sont résumées dans le tableau 1.2 [28].

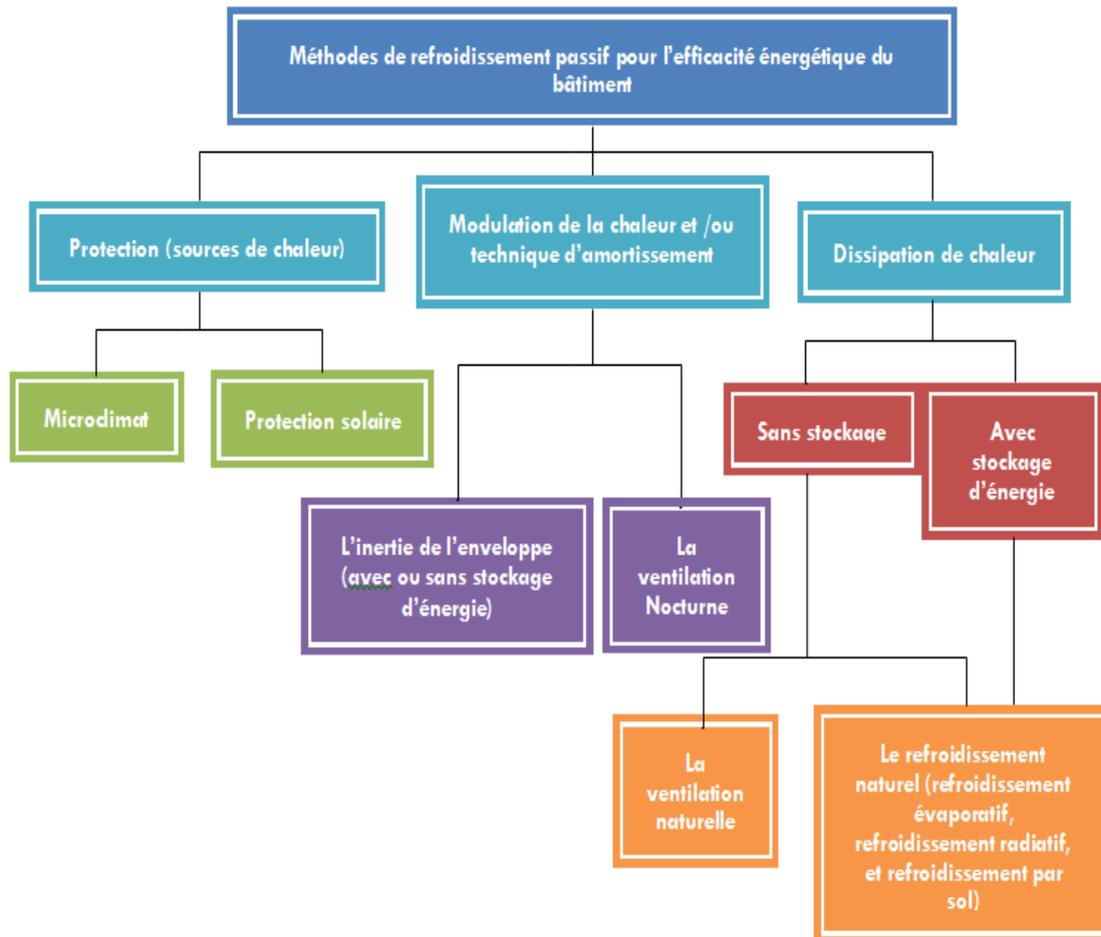
Problématiques	Remarques / Solutions
<b>Exploitation des apports gratuits</b>	
Rayonnement solaire	- Surface vitrée suffisante - Orientation du bâtiment
Gain thermique infrarouge de l'extérieur	- Absorption thermique élevée des surfaces extérieures
Gain thermique interne	- Occupants, système d'éclairage, équipements techniques
Éclairage naturel	- Contrôle d'éclairage
<b>Limitation des déperditions thermiques</b>	
Transmission thermique à travers l'enveloppe: toiture, murs verticaux, plancher, ponts thermiques	- Isolation thermique - Compacité géométrique
Infiltration	- Revêtement / étanchéité
Ventilation	- Stratégie de ventilation (débit et période) - Récupération d'énergie par échangeur thermique sur les systèmes de ventilation double flux

**Tableau 1.2.** Solutions passives pour réduire la consommation énergétique liée au chauffage [28].

### 1.8.2. Méthodes de rafraîchissement passives

Pour un bâtiment bien isolé et très étanche, peut être avantageuse, en même temps, cela peut être un inconvénient en été car la chaleur ne s'évacue plus (effet thermos). Pour remédier cette problématique tout en limitant la consommation énergétique, on peut s'orienter vers le refroidissement passif qui couvre tous les processus naturels et les techniques de refroidissement qui ne nécessitent aucune

forme d'apport énergétique, autre que les sources d'énergie renouvelables. L'organigramme proposé par Geetha et Velraj [29] présente la classification des stratégies passives de rafraîchissement pour un tel bâtiment (figure 1.12).



**Figure 1.12.** Classification des méthodes de refroidissement passif dans les bâtiments économes en énergie [30]

L'utilisation des moyens mécaniques (techniques actives) pour la régulation thermique dans les constructions modernes est utile pour produire des climats favorables. Toutefois, cette solution pose de sérieux problèmes aux niveaux économiques et environnementaux. Par contre, l'intégration de techniques passives dans le bâtiment permet de produire des bâtiments plus efficaces [31]. Selon Santamouris et Kolokosta [32], les techniques de refroidissement passif devraient couvrir trois niveaux:

### **a. Techniques de protection du soleil et de la chaleur**

Les stratégies de refroidissement passif devraient empêcher les gains de chaleur dans le bâtiment. Les paramètres à prendre en compte comprennent l'isolation de l'enveloppe, l'ombrage solaire de la façade et les propriétés de surface, telles que la couleur des surfaces externes (Asimakopoulos, 1996) [33]. De nombreuses études sont disponibles dans la littérature ont montré une réduction significative de la charge thermique. Une augmentation du confort thermique en été et en hiver peut être atteinte en choisissant la meilleure orientation, la taille optimale des fenêtres, la protection solaire et l'épaisseur d'isolation optimale [34-36].

### **b. Techniques de modulation thermique**

La modulation du gain de chaleur concerne la capacité de stockage thermique de la structure du bâtiment. Cette stratégie permet d'atténuer les pics de charge de refroidissement et de moduler la température interne avec une décharge thermique ultérieure. Plus les fluctuations de la température extérieure sont importantes, plus l'effet d'une telle capacité de stockage est important. Le cycle de stockage et de décharge de la chaleur doit être combiné avec des moyens de dissipation thermique, comme la ventilation nocturne, de sorte que la phase de décharge n'ajoute pas à la surchauffe.

### **c. Techniques de dissipation thermique**

Ces techniques utilisent le potentiel de dissipation de l'excès de chaleur dans le bâtiment par un environnement dont la température est plus faible. Cette dissipation dépend de deux facteurs importants [31] :

- La disponibilité d'un environnement pouvant être utilisé comme puits de chaleur.

- L'existence d'un couplage thermique approprié entre le bâtiment et le puits de chaleur, ainsi que l'existence d'une différence de températures suffisante pour assurer un bon transfert thermique.

Le puits canadien est parmi les techniques utilisées pour la dissipation de la chaleur. Ce système utilise le principe d'échange de la chaleur air-sol à travers des conduites enterrées dans le sol et l'air qui circule dans ces conduites. L'air refroidi sera soufflé après à l'intérieur du bâtiment. À une profondeur d'environ 2 à 3 m la température du sol reste assez faible et constante le long de l'année. La performance de tels systèmes varie en fonction de ses caractéristiques telles que la longueur et le diamètre du tuyau, le débit d'air, la profondeur à laquelle le système est enterré, la matière des tuyaux, etc.

### **1.9. Conclusion**

Dans ce chapitre, nous avons constaté que la situation énergétique dans le secteur du bâtiment est très critique. Il reste le plus énergivore à l'échelle mondiale, régionale (la méditerranée), et nationale (Algérie). Il est donc urgent pour l'Algérie de s'inscrire dans une nouvelle vision basée sur une utilisation efficiente des énergies comme facteur de compétitivité et de développement durable d'autant plus dans ce secteur important et en développement. Par conséquent, l'augmentation de l'efficacité énergétique, l'intégration des énergies renouvelables et l'atténuation des impacts climatiques, par la réduction des émissions de gaz à effet de serre, représentent les principaux défis à relever d'autant que le secteur du bâtiment dispose d'un grand potentiel d'économie pour contribuer à cet objectif.

Nous rappellerons la nécessité d'une approche régionale en soutien aux dynamiques nationales à mettre en place ou à renforcer. Une telle dynamique aurait tout son sens et, sous réserve de la mobilisation de tous les acteurs concernés, un véritable scénario "gagnant-gagnant" pourrait être mis en place sur la rive sud de la Méditerranée selon un processus similaire à celui qui a été mis en

place en Europe. La consommation d'énergie dans le bâtiment peut être considérablement réduite par l'adoption des stratégies d'efficacité d'énergie. Du point de vue énergétique, les solutions concernent les différents maillons de la chaîne énergétique et passent par la réduction des besoins énergétiques, l'efficacité des équipements et l'adaptation de la chaîne énergétique aux usages. Du point de vue environnemental, les solutions sont très nombreuses et concernent notamment la rationalisation de l'utilisation des énergies renouvelable, la réduction des émissions polluantes et des déchets et le recyclage des matériaux. Ces solutions, appliquées au bâtiment, amènent à travailler simultanément sur la consommation du bâtiment, sa structure et ses divers équipements, dès la phase de conception [37]. Les paramètres à considérer avant la conception du bâtiment pour une faible consommation énergétique sont traités dans le chapitre suivant.

## Références

1. International Energy Agency, "Key World Energy Statistics", 2017, site web : <https://www.iea.org/publications/.../publication/KeyWorld2017.pdf>
2. O. Edenhofer, R. Pichs-Madruga, Y. Sokona, E. Farahani, S. Kadner, K. Seyboth, A. Adler, I. Baum, S. Brunner, P. Eickemeier, B. Kriemann, J. Savolainen, S. Schlömer, C. V. Stechow, T. Zwickel, J. C. Minx, 2014. IPCC, 2014: Climate change 2014: mitigation of climate change, contribution of working group III to the fifth assessment report of the intergovernmental panel on climate change, cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
3. J. Percebois, Rapport Energie 2050, Centre D'analyse Stratégique, 2012,site web : [https://archives.strategie.gouv.fr/cas/system/files/rapport-energies\\_1.pdf](https://archives.strategie.gouv.fr/cas/system/files/rapport-energies_1.pdf)
4. Commission Energie du CA2D, Club des Acteurs du Développement Durable, Le livre blanc de l'efficacité énergétique, Février 2011, Schneider Electric France, Direction Communication et Promotion Centre PLM F - 38050 Grenoble cedex 9, site web : [www.schneider-electric.fr](http://www.schneider-electric.fr)
5. <https://www.statista.com/statistics/270723/distribution-of-global-greenhouse-gas-emissions-by-sector-worldwide/>
6. E.El. Andaloussi, R. Missaoui, A. Mourtada, S. Pouffary, A. Rozo, Energie, changement climatique et bâtiment en Méditerranée : perspectives régionales, Rapport Plan Bleu Centre d'Activités Régionales PNUE/PAM, Juin 2011.

7. K. Tsikaloudaki, T. Theodosiou, K. Laskos, D. Bikas, Assessing cooling energy performance of windows for residential buildings in the Mediterranean zone, *Energy Conversion and Management*, vol. 64, p. 335-343, December 2012.
8. E. Znouda, N. Ghrab-Morcos, A. Hadj-Alouane, Optimization of Mediterranean building design using genetic algorithms, *Energy and Buildings*, vol. 39, n° 2, p. 148-153, 2007.
9. M. Ouazene, Consommation énergétique du secteur des transports, Bilan et Perspectives, Agence nationale pour la promotion et la rationalisation de l'utilisation de l'énergie APRUE, 03 et 04 juin 2015- Alger.
10. Consommation Energétique Finale de l'Algérien, Chiffres clés : Année 2015, APRUE, Edition 2017, <https://www.aprue.dz/documents/PUBLICATION%20CONSOMMATION%20ENERGETIQUE%20FINALE%202015.pdf>.
11. N. Benarab, 1.6 million de logements durant le quinquennat 2015-2019, Article de presse publié le : 30-05-2014, journal de l'éconews, <http://www.leconews.com/>.
12. C.A. Sénit, L'efficacité énergétique dans le secteur résidentiel : une analyse des politiques des pays du Sud et de l'Est de la Méditerranée, Idées pour le débat N° 14/2008 | Changement Climatique.
13. Ministère de l'Habitat et de l'Urbanisme, Commission Technique Permanente, Réglementation Thermique des Bâtiments d'Habitation et Règles de Calcul des Déperditions Calorifiques, Document Technique Réglementaire, CNERIB, Décembre 1997, Alger, Algérie.
14. Ministère de l'Habitat et de l'Urbanisme, Commission Technique Permanente, Règles de Calcul des Apports Calorifiques, Document Technique Réglementaire, CNERIB, Août 1998, Alger, Algérie.
15. A. Ouahab, Modélisation des consommations d'énergie et des émissions de CO<sub>2</sub> à long terme appliquée au secteur résidentiel algérien, Thèse de Doctorat en Aménagement de l'espace, urbanisme, Université François – Rabelais de Tours, 2015.
16. D. Long. Ha, Un système avancé de gestion d'énergie dans le bâtiment pour coordonner production et consommation, Thèse de Doctorat en Automatique-Productive, Institut polytechnique de Grenoble, 2007.
17. Journal Officiel de République Algérienne, Loi N°99-09 du 28 Juillet 1999 Relative à la Maîtrise de l'Energie, J.O.R.A., N°51, 2 Août 1999, Alger, Algérie.
18. Journal Officiel de République Algérienne, Décret exécutif N°2000-90 du 24 Avril 2000 Portant Réglementation Thermique dans les Bâtiments Neufs, J.O.R.A., N°25, 30 Avril 2000, Alger, Algérie.
19. Actualités maisons passives, projet de maison passive à Nice, <http://www.maison-passive.nice.fr/une-maison-passive/>.

20. S. Gaaloul, Interopérabilité basée sur les standards Modelica et composant logiciel pour la simulation énergétique des systèmes de bâtiment, Thèse de Doctorat en génie électrique, Université de Grenoble, 2012.
21. E. Jayr, J. Laurent, A. Lebert, et J. Chevalier, (2011) Bilan Carbone® appliqué au bâtiment, guide méthodologique. ADEME, CSTB., 56p.
22. J. Villot, Bâtiments et Facteur 4 : de l'émergence d'un objectif global à son application au niveau local. Analyse des problématiques de rénovation dans le secteur résidentiel à caractère social, Thèse de Doctorat en Sciences et Génie de l'Environnement, École Nationale Supérieure des Mines de Saint-Étienne, 2012.
23. R. Pacheco, J. Ordonez, G. Martinez, Energy efficient design of building: A review. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 16:3559–3573, 2012.
24. Manuel de physique du bâtiment, Principes de base des nœuds constructifs, 09.2015/BE-fr/150230.
25. La réglementation climatisation PEB, Module réglementaire pour professionnels de la climatisation : contrôleurs, technicien climatisation PEB, Version juin 2013, site web : [www.bruxellesenvironnement.be](http://www.bruxellesenvironnement.be)
26. H. Ben Nejma, Etude de l'interaction thermoaérodynamique entre un capteur PV et une pompe à chaleur (PAC) intégrés à un bâtiment basse exergie, Thèse de Doctorat en énergétique, École nationale supérieure des mines de Paris, 2012.
27. R. Angioletti, H. Despretz, Maîtrise de l'énergie dans les bâtiments-définitions, usages, consommations, Techniques des ingénieurs, pages 31, 32, 34, 36, 43, 173 et 175.), 2004.
28. R. Lapisa, Etude du rafraîchissement passif de bâtiments commerciaux ou industriels, Thèse de Doctorat de l'Université de La Rochelle, Spécialité : Énergétique et Thermique, 2015.
29. N. B. Geetha, R. Velraj, 2012, Passive cooling methods for energy efficient buildings with and without thermal energy storage: A review, Energy Education Science and Technology Part A: Energy Science and Research 29(2): 913–946.32, 35.
30. M. Kaboré, Enjeux de la simulation pour l'étude des performances énergétiques des bâtiments en Afrique sub-saharienne, Thèse de Doctorat cotutelle entre l'Université Grenoble Alpes et l'Institut International d'Ingénierie de l'Eau et de l'Environnement 2iE, Spécialité : Génie Civil et Sciences de l'Habitat, 2015.
31. I. Sobhi, Modélisation dynamique et monitoring d'une maison moderne à Marrakech : propositions pour améliorer ses performances énergétique. Thèse de Doctorat en physique Université Cadi Ayyad, Laboratoire des Energies Renouvelables et Efficacité Energétique (EnR2E).
32. M. Santamouris, D. Kolokotsa, Passive cooling dissipation techniques for buildings and other structures: The state of the art, Energy and Buildings, Vol.57, pp. 74-94, 2013.

33. M. Santamouris M and D. Assimakopoulos, *Passive Cooling of Buildings*, James and James Science Publishers, London, UK, 1996.
34. S. Jaber, S. Ajib, Optimum technical and energy efficiency design of residential building in Mediterranean region, *Energy and Buildings*, Vol. 43, pp. 1829-1834, 2011.
35. M. Hamdani, S.M.A. Bekkouche, T. Benouaz, M.K. Cherier, A new modeling approach of a multizone building to assess the influence of building orientation in Saharan climate, *Thermal Science*, 19 (suppl. 2), doi : 10.2298/TSCI131217026H.
36. I. Sobhy, A. Brakez, B. Benhamou, Analysis for thermal behavior and energy savings of a semi-detached house with different insulation strategies in a hot semi-arid climate, *Journal of Green Building*, Vol 12, pp. 78-106, 2017.
37. S. Thiers, *Bilans énergétiques et environnementaux de bâtiments à énergie positive*, thèse de Doctorat, Ecole des Mines de Paris, 252 p, 2008.

# **Chapitre 2**

## **Conception de Bâtiments Énergétiquement Efficace Principes et Mesures**

## 2 . Conception de Bâtiments Énergétiquement Efficace : Principes et Mesures

" Le modèle conceptuel de l'architecture s'appuie souvent sur un processus de synthèse de la forme, qui lui permet de passer rapidement d'une appréciation du site à une idée de la forme globale d'un bâtiment, intégrant les contraintes du programme dans des esquisses. Le discours sur la forme du bâtiment avec toutes ses composantes géométrique, topologique, fonctionnelle, structurelle, esthétique, énergétique, environnementale, est donc au centre du discours architectural "

[Pierre Fernandez et Pierre Lavigne]

### 2.1. Introduction

Chaque concepteur de l'architecture a besoin de connaître le climat du site où il va implanter son projet. Chaque site a ses propres caractéristiques en termes de température, vents dominants, ensoleillement, humidité de l'air... etc. Ces variables climatiques représentent des données essentielles pour la conception des bâtiments environnementales. L'interprétation et l'enrichissement de ces données pour la conception architecturale demandent des connaissances géo-climatologiques spécifiques à acquérir par le concepteur.

Les contraintes, les potentiels du site, les variables climatiques et la stratégie énergétique du projet adopté se présentent comme des données de diagnostic de lieu qui sont prises en compte dans la synthèse de la forme architecturale du futur bâtiment en conception. Il est donc essentiel pour l'architecte d'entamer une approche morphologique globale qui tient compte des différentes notions de l'approche climatique environnementale: performance thermique de manière naturelle et passif et autoproduction énergétique par des ressources renouvelables. Dans ce chapitre, nous conduisons un travail exploratoire sur les différents paramètres à considérer à la conception architecturale pour une faible consommation énergétique.

## 2.2. Conception de l'architecture

Dans la plupart des cas au début d'un projet, des études paramétriques doivent être réalisées pour trouver une solution optimale parmi une grande diversité. L'utilisation de mesures passives sur le gain de chaleur solaire ou la ventilation naturelle peut réduire considérablement la consommation d'énergie primaire. Si la bonne conception du bâtiment peut contribuer à la réduction de l'énergie, les sources d'énergie renouvelables (RES) ont un impact bénéfique en remplaçant les carburants classiques par des énergies vertes qui ne produisent pas de pollution de l'air ou de gaz à effet de serre. La conception architecturale détermine l'énergie thermique contenue par l'habitation, la taille des échanges entre l'habitation et l'extérieur et l'impact de la variation de l'énergie thermique sur la température intérieure et donc sur le confort des occupants. L'objectif de cette conception de point de vue thermique est de limiter au maximum les variations du niveau énergétique du bâtiment à travers les trois paramètres suivants [1]:

- Le volume et la nature des matériaux de l'habitation, ils déterminent l'inertie thermique, c'est-à-dire la vitesse à laquelle la température peut évoluer en son sein. Une forte inertie permet de ralentir l'effet des sollicitations thermiques sur la température du bâtiment.
- La nature de l'enveloppe qui détermine la qualité de l'isolation de l'habitation [2]. Une enveloppe fortement isolante limitera les échanges thermiques entre le bâtiment et son environnement.
- La forme du bâtiment joue aussi un rôle important dans l'interaction avec l'environnement. Plus les surfaces extérieures seront importantes, plus le flux solaire reçu sera important, de même pour les échanges convectifs avec l'extérieur.

Une démarche architecturale qui met l'accent sur une conception de qualité se base souvent en priorité sur un bon dimensionnement et des matériaux isolants performants plutôt que sur l'ajout de techniques moins énergivores et exigeantes mais très bénéfiques pour l'environnement [3]. Il est à rappeler d'ailleurs qu'il existe couramment un lien étroit entre la croissance économique et la consommation énergétique [4].

### **2.3. Architecture bioclimatique**

L'architecture bioclimatique également appelée "architecture climatique" ou "architecture naturelle" recherche une synthèse harmonieuse entre la destination du bâtiment, le confort de l'occupant et le respect de l'environnement, en faisant largement appel aux principes de l'architecture. Cette architecture permet de réduire les besoins énergétiques et de créer un climat de bien-être dans les locaux avec des températures agréables, une humidité contrôlée et un éclairage naturel abondant. Ces principes sont fondés sur un choix judicieux de la forme du bâtiment, de son implantation, de la disposition des espaces, des matériaux utilisés et de l'orientation en fonction des particularités du site : climat, vents dominants, qualité du sol, topographie, ensoleillement et vues. De nombreuses études sur les bâtiments les plus performants montrent que la diminution des consommations énergétiques passe par une conception architecturale prenant en compte la compacité du bâtiment et la gestion des apports solaires passifs, une sur-isolation de l'enveloppe (mur et vitrages) et, dans la plupart des cas, la mise en place d'une ventilation efficace.

Nous préciserons que l'architecture bioclimatique nécessite un traitement et une analyse spécifique des données météorologiques, elle se préoccupe de paramètres qui conditionnent le bien être de l'habitant, c'est à dire que la composition des solutions architecturales doit répondre à un résultat de performance thermique et énergétique voulu [5]. Plusieurs mesures passives peuvent être considérées lors de la conception d'un bâtiment afin de minimiser le

recours aux systèmes CVCA<sup>1</sup> pour maintenir le confort et même par le fait d'améliorer l'efficacité énergétique du bâtiment.

### 2.3.1. Critère climatique et son intégration

Le premier objectif est la gestion harmonieuse des bâtiments: il vise à exploiter au mieux les opportunités offertes par le site sur lequel sera implantée, la végétation et les constructions qui entourent son site, les routes qui passent à proximité, etc. La prise en compte de tous ces points est fondamentale pour la bonne intégration du projet mais c'est insuffisant. Il a fallu aussi prendre en considération les spécificités du climat mis en question.

La notion de confort thermique peut paraître très subjective! Telles conditions seront confortables pour un individu et inconfortables pour un autre. Des études très poussées ont été faites par Fanger [6] pour déterminer les paramètres du confort tout en indiquant la différence entre les individus. La qualité thermique des bâtiments au Maghreb y est généralement très insuffisante; cela entraîne des consommations d'énergie excessives pour les bâtiments conditionnés et des conditions très inconfortables pour les autres. Cependant, si le climat maghrébin est tel qu'il suscite des besoins de chauffage l'hiver et de refroidissement l'été, la modération même du climat permet de satisfaire la quasi-totalité des besoins de manière naturelle, particulièrement dans le secteur résidentiel. L'idée forte est que la réglementation du secteur résidentiel soit basée sur une qualité de confort minimale à réaliser par le bâti de manière naturelle [7].

En Algérie, les conditions climatiques ne correspondent pas souvent aux zones de confort toute l'année. Alors Il est nécessaire de corriger les conditions climatiques extérieures par des solutions proprement architecturales et techniques passives pour améliorer le confort thermique à l'intérieur. L'objectif à poursuivre est donc d'obtenir la meilleure adéquation entre le climat du lieu, le bâtiment et le

---

<sup>1</sup> CVCA : Chauffage, Ventilation et Conditionnement d'air

comportement humain d'usage. La prise en compte du climat et l'utilisation de l'énergie solaire passive dans la conception d'un bâtiment doivent être intégrés dans un processus logique [5]. Les stratégies de contrôle du climat font appel à des principes physiques simples qui sont récapitulées dans le tableau 2.1. Les phénomènes d'échange thermique ont lieu sous forme de conduction, convection, rayonnement et évaporation. Selon la saison et le climat on utilisera chacun de ces principes de base pour élaborer une stratégie de contrôle propre au projet architectural.

		Conduction	Convection	Rayonnement	Evaporation	
Stratégies de contrôle	Hiver	Favoriser les gains		Minimiser la vitesse d'air sur la peau externe	Favoriser les gains solaires	
		Résister aux pertes	Minimiser les flux de chaleur par conduction	Minimiser les infiltrations d'air		
	Été	Résister aux gains (se protéger)	Minimiser les flux de chaleur par conduction	Minimiser les infiltrations d'air	Minimiser les gains solaires	
		Favoriser les pertes (évacuer)	Favoriser les échanges avec le sol (terre)	Favoriser la ventilation	Favoriser le refroidissement par rayonnement	Favoriser le refroidissement par évaporation

**Tableau 2.1.** Principes physiques et stratégies de contrôle en architecture climatique [8].

Pour choisir les principes adéquats et les dimensionner on distingue deux stratégies: l'hiver et l'été. En pratique on ne pourra pas aussi facilement séparer ces principes. Le choix d'un concept pour la période froide aura des conséquences directes sur le comportement du bâtiment en période chaude. Le défi à relever donc est de trouver un compromis entre ces principes qui peuvent sembler contradictoires dans l'objectif de réduire les besoins énergétiques, d'améliorer le confort et la qualité de l'air intérieur tout en veillant à rester dans un intervalle économiquement acceptable.

### 2.3.2. Forme et compacité

La 2<sup>ème</sup> approche consiste à étudier la forme du bâtiment, et l'une des questions essentielles à se poser concerne sa compacité. Elle représente le rapport entre le volume habitable et l'ensemble des surfaces de déperdition. Dans les climats tempérés, les déperditions thermiques des bâtiments se font principalement par conduction au droit de l'enveloppe. Il s'ensuit que, ces pertes sont d'autant plus réduites que les surfaces d'enveloppe sont optimisées par rapport au volume habitable. Ainsi, plus les bâtiments sont denses, moins ils sont soumis à la température extérieure et plus ils sont énergétiquement efficaces [9].

Dans les régions à climat chaud et aride le soleil est considéré comme source d'inconfort qui provoque une surchauffe gênante pendant la période estivale; on pense à la résolution de ce problème par une production architecturale d'édifices ayant une meilleure performance énergétique vis-à-vis des conditions climatiques d'été. Cela ne peut se faire que par une approche bioclimatique qui vise l'intégration très tôt de la composante énergétique dans le processus de la conception architecturale afin de prendre en considération le choix d'une enveloppe (forme) adaptée aux besoins thermiques parce qu'il est difficile de contrôler la thermique si cette précaution n'est pas prévue [10].

La morphologie du bâtiment est un facteur important qui influence la demande en énergie pour chauffer ou refroidir l'espace occupé. La forme d'un bâtiment a également un impact important sur les coûts de construction [11]. Depecker et al. [12] ont étudié la relation entre la forme du bâtiment et la consommation d'énergie (figure 2.1). En 2007, Ourghi et al. [13] ont mis au point une méthode d'analyse simplifiée pour prédire l'impact de la morphologie d'un immeuble de bureaux sur l'énergie nécessaire pour le refroidissement. Ils ont conclu que l'optimisation de la forme d'un bâtiment est un élément essentiel si on veut réduire les coûts de construction et réduire la consommation d'énergie. Une étude similaire, mais avec une base de données étendue et des formes de

construction spéciales (c'est-à-dire la forme en H) a été réalisée par AlAnzi [14] pour les immeubles de bureaux au Koweït. La méthode simplifiée qu'ils ont obtenue convient aux architectes lors de la phase de conception préliminaire pour évaluer l'impact de la forme sur l'efficacité énergétique des immeubles de bureaux. L'optimisation de la forme et de la structure fonctionnelle des bâtiments à économie d'énergie a été le travail de recherche de Jedrzejuk et Marks [15]. L'objectif était de présenter des méthodes rationnelles d'optimisation multicritères de la forme ainsi que l'optimisation des sources de chaleur en tenant compte des critères énergétiques.

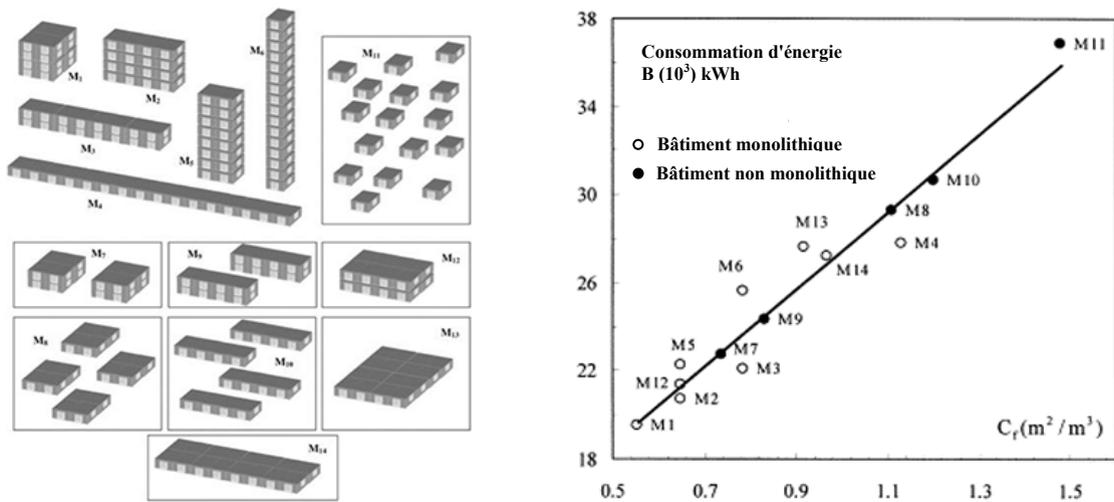


Figure 2.1. Relation entre compacité et consommation de chauffage : analyse comparée de quatorze morphologies de bâtiments [12]

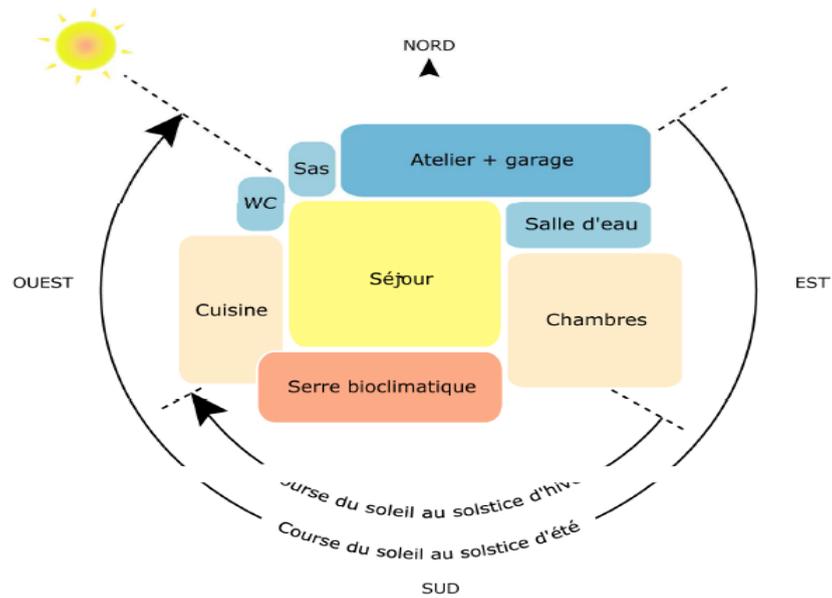
### 2.3.3. La gestion des apports solaires et l'orientation

Avant tout, dans une approche bioclimatique le bâtiment doit pouvoir tirer tout le profit du potentiel solaire, c'est-à-dire maximiser le captage solaire en hiver pour fournir de la chaleur gratuite à l'édifice, tout en minimisant ces gains de chaleur pendant l'été. Le captage solaire consiste essentiellement à optimiser l'orientation du bâtiment et à installer du vitrage performant.

La première stratégie de captage consiste à étudier l'orientation solaire au début de la conception pour examiner les différentes possibilités d'organisation des

pièces selon leur usage et les besoins en chaleur. Dans un deuxième temps, l'utilisation de protections solaires permettra de tirer profit du soleil en hiver et de limiter ses effets en été (réductions des apports indésirables), donc de réduire la charge de climatisation. L'orientation vers le Sud d'un bâtiment favorise les apports solaires en hiver, fournissant une part importante d'énergie gratuite et renouvelable (10 à 20% environ) pour les besoins de chauffage et d'éclairage [16]. D'ailleurs, la littérature a démontré que cette orientation reste la plus favorable quelle que soit la latitude [17]. Le seul fait d'orienter correctement une habitation et de positionner adéquatement ses fenêtres par rapport au parcours du soleil, réduit sa consommation énergétique pour le chauffage, pour la climatisation et même pour l'éclairage. Être cohérent dans les choix de la forme, l'orientation ou encore la performance de l'enveloppe peut permettre une réduction de 40 % des consommations d'énergie [18]. L'orientation des bâtiments est à corrélérer avec la surface vitrée afin de favoriser les apports solaires passifs en hiver. D'un point de vue thermique, les surfaces vitrées verticales sont mieux adaptées aux rayons d'hiver, tout en limitant la pénétration des rayons en été. À l'inverse, les ouvertures horizontales apportent très peu de chaleur en hiver et causent de la surchauffe en été. En règle générale, on propose :

- Une maximisation des surfaces vitrées orientées au Sud, protégés du soleil estival par des casquettes horizontales.
- Une minimisation des surfaces vitrées orientées au Nord. En effet, les apports solaires sont très faibles et un vitrage sera forcément plus déperditif qu'une paroi isolée,
- Des surfaces vitrées raisonnées et réfléchies pour les orientations Est et Ouest afin de se protéger des surchauffes estivales. Par exemple, les chambres orientées à l'Ouest devront impérativement être protégées du soleil du soir.

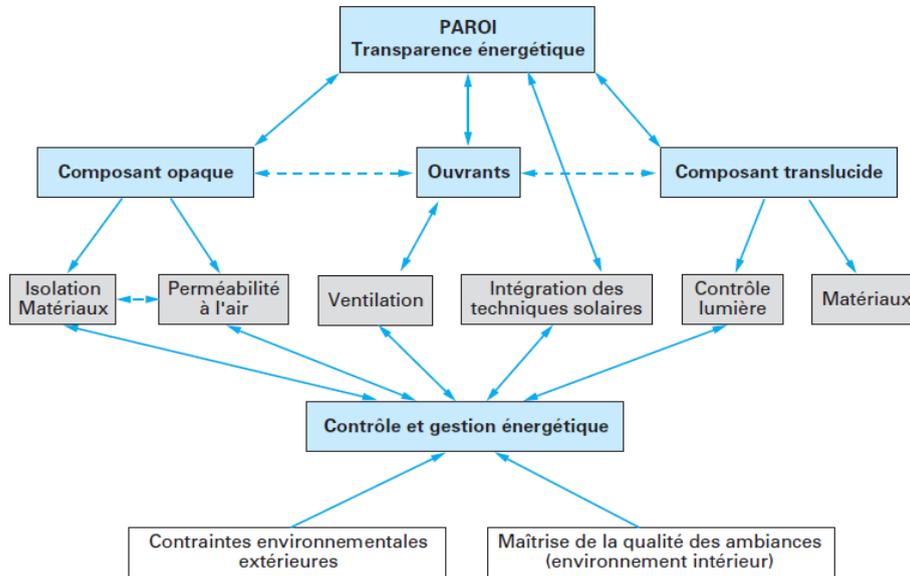


**Figure 2.2.** Disposition conseillée des pièces pour un meilleur gain [19].

### 2.3.4. Les éléments de l'enveloppe

L'enveloppe joue un rôle clé pour la détermination des niveaux du confort thermique, visuel, acoustique et olfactif. Ainsi, elle est un élément majeur pour améliorer l'efficacité énergétique des bâtiments et diminuer les émissions des gaz à effet de serre, que ce soit dans le neuf ou dans l'existant [20]. Dans certains pays, la performance énergétique de l'enveloppe du bâtiment a été considérablement négligée (IEA, 2014). Tandis qu'il y avait un succès considérable dans l'amélioration de l'efficacité énergétique des appareils d'éclairage, de chauffage et de refroidissement, de nombreux bâtiments en cours de construction sont toujours énergivores.

En se plaçant dans le contexte général de la maîtrise, de la demande énergétique et de la réduction des gaz à effet de serre. L'approche intégrée de la performance énergétique de l'enveloppe est considérée comme composant thermique, elle demande une analyse multicritère des composants et des fonctions à assurer (figure 2.3) [21].



**Figure 2.3.** Composants et fonctions de l'enveloppe du point de vue de la performance énergétique

### 2.3.4.1. Les parois opaques

On distingue communément trois types de parois opaques : les murs, qui ont très souvent la plus grande surface de contact avec l'extérieur, les toitures, plus sollicitées thermiquement que les murs, les sols ou planchers, pour lesquels les exigences thermiques sont moindres. La majorité des parois opaques sont construites soit avec des murs en bois, en charpente métallique, en béton, en briques ou en maçonnerie. Elles sont caractérisées par une transmission thermique  $U$ , par une capacité thermique  $\rho$  et par un coefficient d'absorption solaire  $\alpha$ .

Pour réduire la valeur du coefficient de transmission des parois, la solution la plus évidente est d'ajouter des matériaux isolants qui forment une barrière contre les fluctuations de température et apporte ainsi le confort aux occupants d'une maison. Nous citons quelque valeur du coefficient de transmission  $U$  ainsi que l'épaisseur de l'isolant exigées pour différents types d'habitat [22].

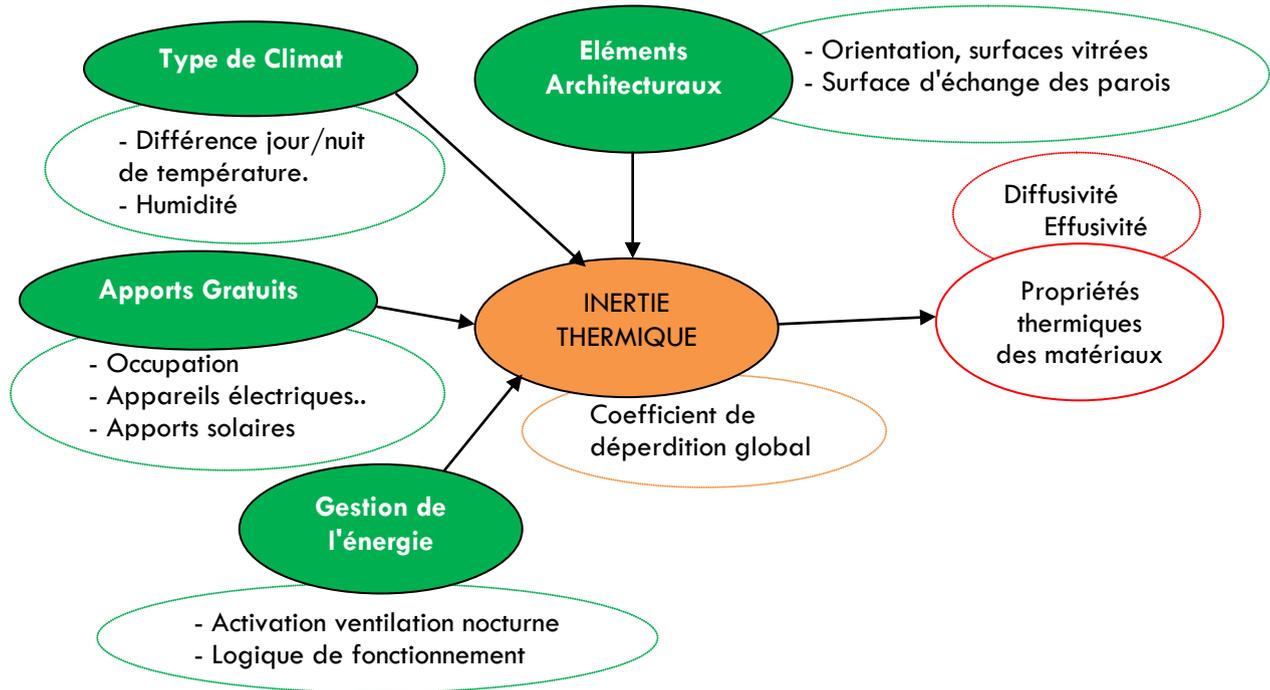
Demande énergétique en KWh/m <sup>2</sup> a		250 - 300	100 - 150	40 - 50	≤ 15
Type de parois	Murs extérieur (25cm)	1.30 W/m <sup>2</sup> K 0 cm	0.40 W/m <sup>2</sup> K 6 cm	0.20 W/m <sup>2</sup> K 16 cm	0.10 W/m <sup>2</sup> K 34 cm
	Plafond	0.9 W/m <sup>2</sup> K 4 cm	0.22 W/m <sup>2</sup> K 22 cm	0.15 W/m <sup>2</sup> K 30 cm	0.10 W/m <sup>2</sup> K 40 cm
	Plancher bas	1.0 W/m <sup>2</sup> K 2 cm	0.40 W/m <sup>2</sup> K 7 cm	0.25 W/m <sup>2</sup> K 20 cm	0.12 W/m <sup>2</sup> K 30 cm
	fenêtre	2.60 W/m <sup>2</sup> K Simple vitrage	1.70 W/m <sup>2</sup> K Double vitrage	1.10 W/m <sup>2</sup> K Double vitrage (argon)	0.80 W/m <sup>2</sup> K Triple vitrage

**Tableau 2.2.** Les valeurs de U et l'épaisseur de l'isolant exigées pour chaque partie de la maison

### 2.3.4.2. Inertie thermique

Les concepteurs sont obligés dans la plupart des cas d'utiliser des simulations dynamiques pour mieux voir l'impact de l'inertie sur la consommation d'énergie du bâtiment [23]. La masse thermique peut apporter une contribution positive à l'environnement intérieur et à la performance énergétique des bâtiments, à la fois en été et en hiver. En été, une chaleur excessive est absorbée et peut réduire le besoin de refroidissement durant la journée. En hiver, l'énergie du soleil et les gains de chaleur internes peuvent être absorbés dans la masse thermique de la construction pendant la journée et progressivement relâchés à l'air intérieur de nuit, réduisant totalement ou partiellement le besoin de chauffage [23, 24]. Ya Feng [25] a conclu dans son travail que les paramètres quantitatifs les plus importants pour la conception des parois extérieures et des toits extérieurs efficaces sont les coefficients de transfert de chaleur et l'indice d'inertie thermique. Les avantages d'une masse thermique élevée du bâtiment ne sont pas seulement liés à la réduction d'énergie, mais aussi au confort thermique intérieur des habitants. En réalité, il existe une difficulté à faire apparaître le lien entre les propriétés des matériaux et les performances énergétiques globales du bâtiment. Sur la figure 2.4, on tente de mettre en relief les principaux paramètres intervenant entre l'échelle des matériaux et du bâtiment et d'identifier la place de

l'inertie thermique dans le processus de conception. En bref, la conception bioclimatique des bâtiments avec des matériaux locaux et les écomatériaux permet ainsi de faire des grandes économies d'énergie (climatisation et éclairage) de bénéficier d'un confort élevé et aussi d'avoir une maison saine.



**Figure 2.4.** Incorporation de l'inertie thermique lors de la conception d'un bâtiment [26]

En phase d'esquisse architecturale, il est bien de mettre les grandes lignes d'une structure portante lourde, type murs intérieurs et extérieur massifs, hourdis de béton ou de terre crue, etc. Il faut bien disperser la masse thermique un peu partout dans les habitations, mais plus particulièrement dans les pièces exposées au Sud, à l'Est et à l'Ouest [5].

### 2.3.4.3. Isolation thermique

D'une façon générale, on peut constater que moins la structure du bâtiment est inerte, et plus son isolation doit être performante et la protection solaire en été efficace. Toutes les parties de l'enveloppe sont concernées par cette isolation renforcée : les murs, planchers, toitures et les ouvertures (qu'il s'agisse des fenêtres

ou des portes extérieures). En pratique, une des plus grosses déperditions de chaleur dans un bâtiment (20-25%) se produit à travers les façades, d'où l'importante attention que l'on porte à l'isolation des murs qui est plus complexe que l'isolation des sols<sup>2</sup> et des toitures<sup>3</sup>. L'inertie dépend de la position de l'isolant: l'isolant extérieur valorise l'inertie, l'isolant intérieur neutralise l'effet de l'inertie. En fonction de la performance du matériau utilisé pour l'isolation, une épaisseur doit être également choisie de manière à satisfaire les exigences réglementaires relatives à la région géographique.

Le concept d'épaisseur économique considère le coût initial du système d'isolation et l'économie d'énergie sur la durée de vie espérée. Cette valeur économique correspond au coût minimum sur tout le cycle de vie [27]. Il est bien connu que la transmission de chaleur diminue avec l'épaisseur d'isolation adoptée. Le choix le plus évident tendrait à adopter le matériau ayant la plus petite conductivité thermique associée à la plus grande épaisseur que le propriétaire pourrait se permettre de financer. Cependant, le taux de diminution de la consommation énergétique baisse rapidement avec l'épaisseur alors que le coût de l'isolation augmente linéairement en fonction de la quantité de matériau. Il existe alors un certain point au-delà duquel le gain en consommation énergétique n'est plus compensé par le coût supplémentaire du matériau et de son installation. En d'autres termes, il existe une épaisseur d'isolation optimale à laquelle le coût total d'investissement et de consommation serait minimal [28].

### Choix des isolants

Plusieurs facteurs peuvent entrer en compte dans le choix d'un matériau d'isolation: son prix, sa durée de vie, son impact environnemental et bien sûr sa dépend de la performance minimum exigée, de la zone climatique et de

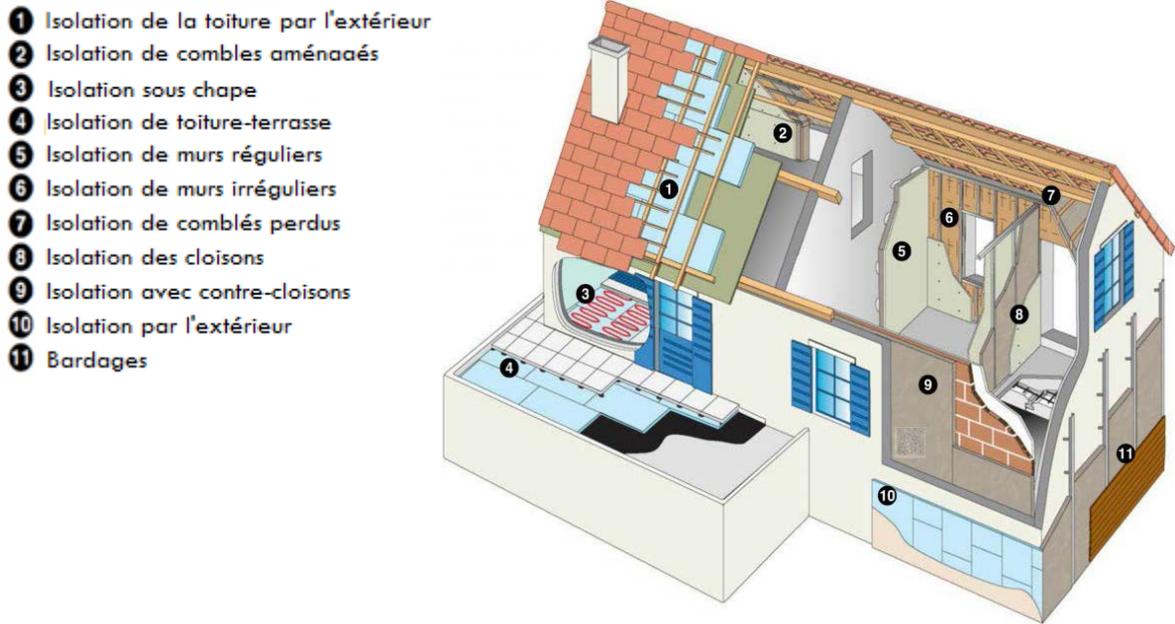
<sup>2</sup> L'isolation des sols est moins poussée que celle des murs car en hiver la température du sol est plus élevée que la température extérieure.

<sup>3</sup> Au niveau de la toiture, l'isolation est généralement plus importante qu'ailleurs, en raison de la facilité de la mise en œuvre de fortes épaisseurs et des pertes potentielles plus élevées.

l'application. De nombreuses études ont porté sur la stratégie de choix des matériaux d'isolation [29-31]. Cependant, les experts pensent qu'il n'existe pas de solutions d'isolation qui garantissent en tout point l'ensemble des exigences réglementaires [32], en raison des incertitudes physiques inévitables. Ces incertitudes réfèrent le plus souvent aux propriétés physiques du matériau tels que sa masse volumique ou sa conductivité thermique mais aussi à sa géométrie approximative, notamment son épaisseur [33, 30]. Dans la littérature, la majorité des travaux s'intéressent aux matériaux usuels utilisés en construction tels que le polystyrène, la laine minérale, les fibres de verre et le polyuréthane [34-36]. Toutefois, on s'intéresse depuis peu au développement de d'autres matériaux à meilleure structure interne tels que les isolants multicouches à très faibles conductivités thermiques effectives [37, 38]. Certains auteurs ont tenté de démontrer expérimentalement que le choix de l'isolation devrait être basé sur la variabilité à long terme des propriétés isolantes des matériaux et non pas uniquement sur la valeur initiale. A titre d'exemple, Cabeza et al. [39] ont comparé l'évolution de la consommation énergétique de trois maisons identiques isolées différemment (Polyuréthane 0.028 W/m K, Polystyrène 0.034 W/m K et Laine minérale 0.035 W/m K) à une maison non isolée.

### **Isolation thermique des façades**

Il existe plusieurs techniques d'isolation des façades. L'isolation thermique par l'intérieur (ITI), l'isolation thermique par l'extérieur (ITE) et le système constructif à isolation thermique répartie (ITR). La figure 2.5 résume tous les cas illustratifs de ces différents procédés. Quelle que soit la position du matériau isolant dans la paroi, la résistance thermique est la même. Cependant, les performances en termes d'inertie thermique seront très différentes selon l'emplacement de l'isolant (à l'intérieur ou à l'extérieur). Il en est de même pour la problématique des ponts thermiques et de la condensation.



**Figure 2.5.** Les emplacements des isolants dans les façades de l'enveloppe [40].

- L'isolation thermique par l'intérieur (ITI), consiste à intégrer le complexe isolant thermique sur la face intérieure du mur. l'ITI est le principal mode constructif capable de répondre aux exigences de rénovation thermique du patrimoine architectural ancien en évitant de modifier l'aspect extérieur de la façade. Cependant, elle entraîne une réduction de la surface des pièces, importante lorsqu'il s'agit de construire BBC.
- L'isolation thermique par l'extérieur (ITE) est la plus performante car, en enveloppant les parois, on ne modifie pas la surface habitable et on protège les parois des variations climatiques. l'ITE consiste à fixer des isolants en mousse synthétique ou en laine minérale et à les recouvrir d'un bardage en bois, en pierre, en matériau de synthèse ou d'un enduit de façade. Ce type d'isolation est à privilégier d'un point de vue thermique car elle offre de nombreux avantages, tels que la prévention de la condensation de l'humidité et l'utilisation de la masse thermique du bâtiment, ainsi que le traitement efficace des différents ponts thermiques et des liaisons courantes généralement observés avec l'isolation par l'intérieur [27].

- Le système constructif d'isolation répartie (ITR) consiste quant-à-lui à utiliser l'épaisseur de la paroi porteuse pour isoler. Ce système permet de réduire les ponts thermiques des planchers tout en tirant partie de l'inertie des murs pour récupérer les apports solaires en hiver et réduire l'inconfort en été.

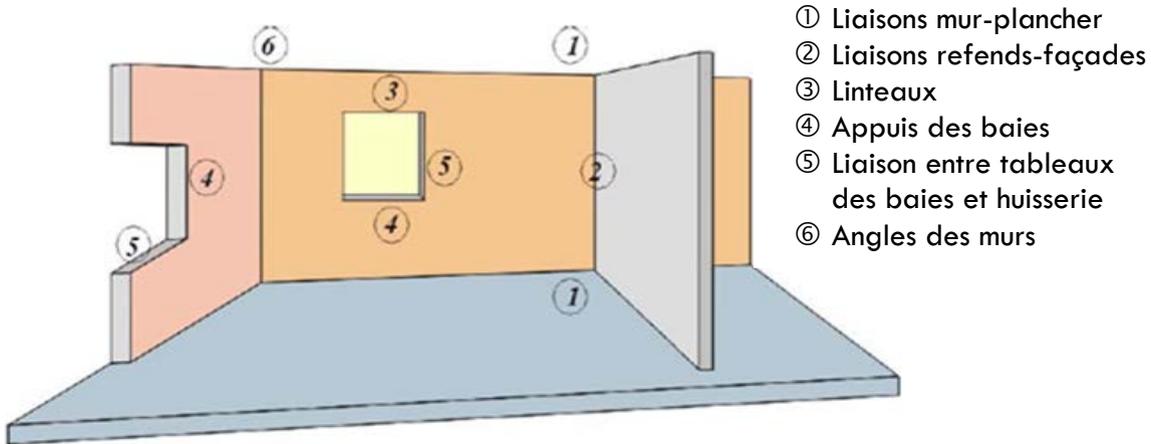
D'après plusieurs études et retours d'expériences sur les bâtiments les plus performants, les experts ont jugé que la meilleure façon de réduire la consommation d'énergie est d'améliorer l'isolation thermique par l'extérieur. Elle doit être hautement performante et appliquée sur toute l'enveloppe extérieure du bâtiment, sans interruption ni brèche afin de limiter les ponts thermiques. La nouvelle technologie existante en Algérie (Groupe des Entreprises Hasnaoui) [41] consiste à utiliser, à la place de la couverture traditionnelle de l'enveloppe en double paroi, l'isolation extérieure avec une paroi, une plaque de polystyrène et un crépi. Cette nouvelle technique permet de :

- Protéger la structure des bâtiments,
- Résister aux intempéries,
- Economiser l'énergie (coût du m<sup>3</sup> = 1000 DA),
- Diminuer les délais de construction: 8 m<sup>3</sup>/jour/personne ou 24 m<sup>3</sup>/jour/3 personnes [42].

#### **2.3.4.4. Ponts thermiques**

La discontinuité de l'isolation dans les composants de l'enveloppe cause la variation de la résistance thermique et donc crée ce qu'on appelle les ponts thermiques. Au voisinage de ceux-ci, les lignes de flux thermique se resserrent, ce qui provoque plus d'échange de chaleur par unité de surface. D'autre part, au delà de la problématique énergétique, il faut souligner le fait que la présence des ponts thermiques génère un risque de pathologie du bâtiment. En effet, les ponts thermiques créent à l'intérieur des bâtiments des points froids sur lesquels l'humidité de l'air peut se condenser. Cela génère alors des traces d'humidité, des

moisissures (entraînant odeurs et allergies) et des coulures [27]. Ce point de vigilance renvoie, au-delà de la conception, à l'attention particulière à porter sur les interfaces entre les lots au cours des travaux, nécessitant des points de contrôle rigoureux aux différentes étapes du chantier.



**Figure 2.6.** Principaux ponts thermiques d'une enveloppe

L'importance relative des pertes dues aux ponts thermiques augmente en même temps que le niveau d'isolation générale. Dans le cas d'une maison passive, le niveau de performance de l'isolation est très élevé : les ponts thermiques ont donc des conséquences importantes. Les quatre règles suivantes permettent de réduire le risque de pont thermique [43]:

- Règle de prévention : dans la mesure du possible, ne pas interrompre l'enveloppe thermique
- Règle de pénétration : là où une interruption est inévitable, la résistance thermique dans le plan d'isolation doit être aussi haute que possible
- Règle d'articulation : aux articulations entre les éléments du bâtiment, les couches d'isolation doivent se rejoindre sans interruption ni décalage
- Règle de géométrie : préférer autant que possible les angles obtus ; les angles aigus favorisent en effet la dispersion de la chaleur.

En pratique, le traitement complet des ponts thermiques permet de réduire fortement leur impact et d'améliorer ainsi la performance de l'enveloppe. Néanmoins, il est encore difficile de les supprimer complètement. Par conséquent, il

est nécessaire de les intégrer dans le calcul de la résistance de la paroi. Dans la littérature, on estime que les pertes de résistance murale seraient de 20 à 30% supérieures à celles du modèle idéalisé, en raison des PT [44] et pourraient même dépasser 40% dans certains bâtiments [45]. Cette littérature est très riche, nous pouvons citer les travaux de Theodosiou et Papadopoulos [46]. Ces derniers ont étudié l'influence des PT dans les éléments de construction verticaux, notamment les doubles parois utilisées en Grèce. Ils ont constaté que les PT entraînent 30% de besoins en chauffage additionnels. Dans le cas de l'isolation des toits, Al Sanea [47] s'est intéressé à l'effet des PT entre les éléments constituant les toits de bâtiment et a constaté qu'environ 40% des pertes de chaleur par les toits se faisaient par les côtés alors que ces derniers ne représentent que 20% de la surface du toit.

#### **2.3.4.5. Les ouvertures**

Les ouvertures sont les moyens de communication de l'édifice : leurs positions, leurs dimensions et leurs proportions règlent l'entrée de l'air, de la lumière et du soleil. Dans tous les composants de l'enveloppe, la fenêtre est l'élément le plus critique à cause de ses multiples fonctions : outre ses qualités d'isolation, elle doit permettre la vue vers l'extérieur, être ouvrable et pouvoir se fermer parfaitement, et en plus, elle doit aussi capter un maximum d'énergie solaire. Elle joue un rôle important dans les relations du bâtiment et de l'occupant avec son environnement. En effet, les échanges de chaleur, les déperditions thermiques et les apports de chaleur ainsi que les apports solaires proviennent principalement des fenêtres. Celles-ci établissent le contact entre l'extérieur et l'intérieur et permettent ainsi d'améliorer le bien-être de l'occupant. Les ouvertures, et particulièrement les fenêtres, sont donc un élément majeur de tout édifice et ont toujours bénéficié de la plus grande attention des architectes.

Les fenêtres se composent dans le majoritaire d'une partie de vitrage qui est un élément important de construction pour les architectes et les ingénieurs compte

tenu de ses effets sur l'éclairage naturel et son potentiel sur la réduction de la demande d'énergie pour le chauffage en hiver. L'utilisation de fenêtres performantes du point de vue thermique serait meilleure que d'avoir des murs isolés mais sans fenêtre. Les baies vitrées et leur distribution sur l'enveloppe sont aussi des paramètres essentiels lors de la conception d'un bâtiment [48]. En effet, l'énergie nécessaire au chauffage peut être réduite si on augmente la surface vitrée et que 60% de cette surface se trouve orientée vers le sud [11].

Les vitrages se caractérisent par un coefficient de transmission thermique  $U_g$ , par un facteur solaire  $F_s$ , et par un facteur de transmission lumineuse  $\tau_l$ . Au cours des dernières années, il y a eu des progrès significatifs dans les technologies de vitrage tels que les vitrages isolés (par exemple un double vitrage avec une lame de gaz comme l'argon ou le krypton entre les vitres), les vitrages à contrôles solaires, vitrages à faible émissivité (low-e). Des fenêtres très performantes sont aussi apparues comme la fenêtre pariétodynamique et les vitrages aérogels qui ont un coefficient de transmission thermique très faible qui varie entre 0.1 et 0.5  $W/m^2 K$  [49,44]. La figure 2.7 présente les caractéristiques de certains types de vitrage et les limites réglementaires du coefficient de transmission thermique.

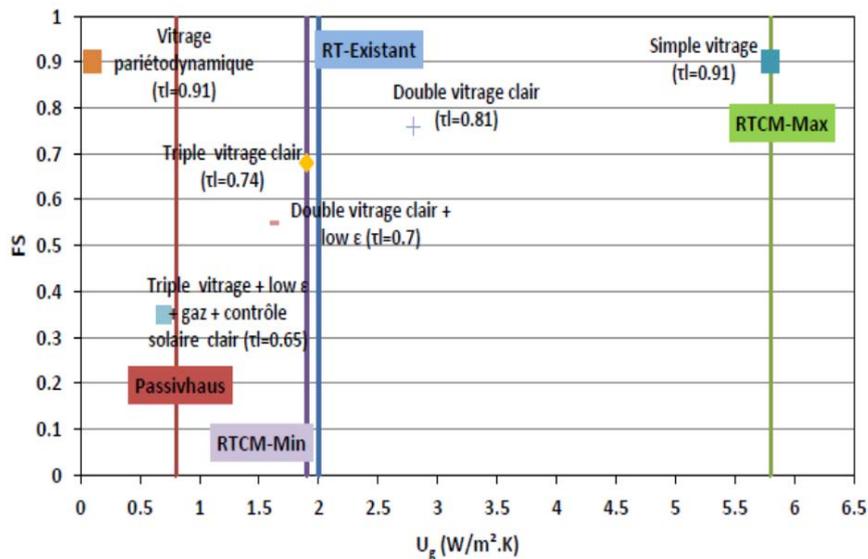


Figure 2.7. Caractéristique de certains types de vitrage et limites réglementaires du coefficient de transmission thermique [50].

Pour diminuer le facteur solaire d'un vitrage, deux techniques sont possibles. La première est de déposer sur la face interne de la vitre extérieure une fine couche transparente de métaux nobles par pulvérisation cathodique afin de réaliser un vitrage à contrôle solaire. Ce vitrage permet de bloquer la chaleur jusqu'à 80% [51]. La deuxième technique est de réaliser des protections solaires fixes ou mobiles que nous présentons par la suite.

#### **2.3.4.6. Protection solaire**

La protection solaire est un élément clé pour améliorer l'efficacité énergétique et la gestion de la lumière naturelle des bâtiments existants et optimiser la conception des bâtiments de basse consommation. Cette technologie est encore sous-utilisée bien qu'elle ait un impact majeur sur la réduction de la consommation d'énergie des constructions et qu'elle améliore le confort thermique et visuel des occupants [52]. Il existe trois types de protections solaires, celles associées au vitrage de la fenêtre, celles fixes qui sont liées à l'enveloppe du bâtiment (les casquettes solaires, brise-soleil...) et les protections solaires mobiles qui peuvent être fermées ou ouvertes en fonction des usagers ou de la gestion technique du bâtiment (les stores, persiennes ...). Ces protections permettent de réduire le facteur solaire, mais réduisent aussi la transmission lumineuse du vitrage [50]. En effet, les dispositifs de protection solaire permettent d'ajuster les propriétés des fenêtres et des façades aux conditions climatiques et aux besoins des occupants. Une bonne gestion de ces systèmes peut alors :

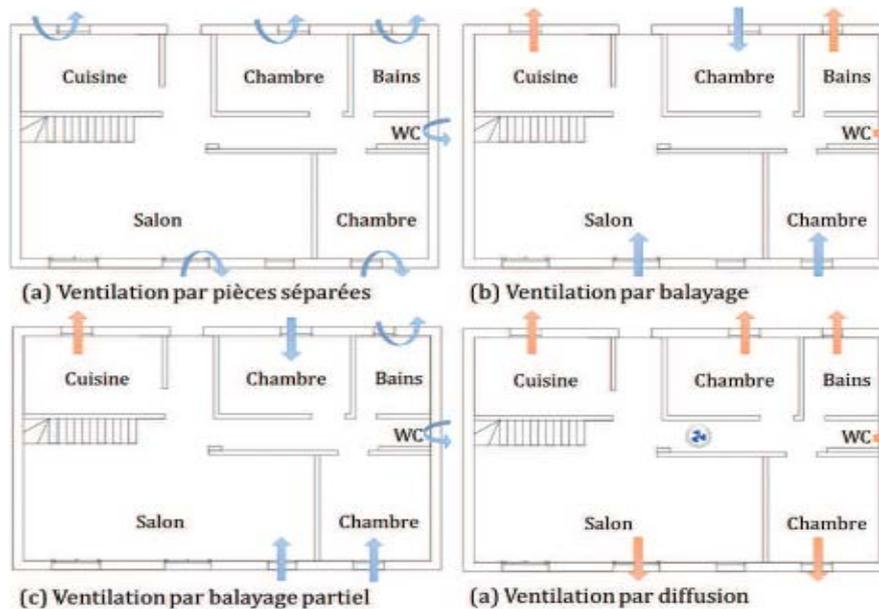
- Maximiser les apports solaires en hiver, réduisant ainsi les besoins de chauffage.
- Minimiser ces apports en été réduisant ainsi les besoins de refroidissement tout en apportant en même temps un bon confort visuel pour les occupants.

Afin de faire un choix pertinent en termes de produits et de gestion de la façade lors de la conception d'un nouveau bâtiment ou de travaux sur un bâtiment existant, il est nécessaire de prendre en considération les caractéristiques des dispositifs de protection solaire. En effet, ces produits ont un impact sur le niveau

d'isolation de la façade, son facteur de transmission solaire et son facteur de transmission lumineuse. En conséquence, il est nécessaire de trouver le meilleur équilibre entre toutes ces caractéristiques en fonction des propriétés du bâtiment, son emplacement et son orientation [52].

### 2.3.5. L'étanchéité à l'air / Ventilation

Si les anciennes constructions trouvaient leurs équilibres à l'aide de la ventilation naturelle par les défauts d'étanchéité de l'enveloppe, les nouvelles constructions cherchent à limiter ces fuites d'air afin de diminuer les déperditions de chaleur. Sur le plan sanitaire, le renouvellement de l'air intérieur est indispensable. Pour ce faire, il existe 4 principes d'aération illustrés par la figure 2.8 : par pièces séparées, par balayage, par balayage partiel et par diffusion.



**Figure 2.8.** Les principes de la ventilation [53].

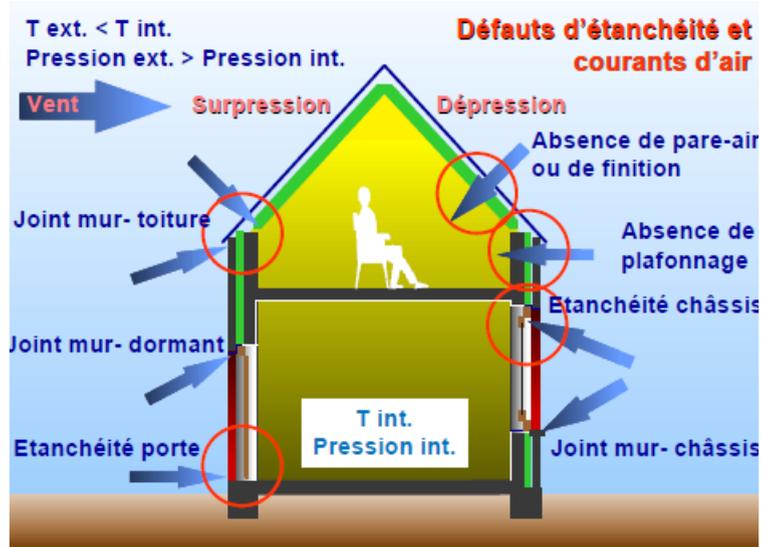
La ventilation par pièces séparées consiste à installer des entrées et des sorties d'air dans chaque pièce. La ventilation par balayage se base sur le "bon" cheminement de l'air: depuis les pièces les moins polluées vers les pièces les plus polluées. Ainsi, les entrées d'air seront dans les pièces de vie (chambres, salon, bureau,...) et les sorties d'air dans les pièces de services (cuisine, salle de

bain/douche et salles d'aisance). Quant au principe du balayage partiel, c'est un mixte des deux types précédents: les entrées et les sorties d'air sont dans des pièces différentes, mais le cheminement n'est pas maîtrisé. Par exemple, on peut avoir des entrées d'air dans les pièces de vie, une évacuation dans la cuisine et une aération séparée de la salle de bain et les WC. Enfin, la ventilation par diffusion consiste à introduire l'air mécaniquement par un ou deux points centraux du logement et à l'évacuer par chacune des pièces (pièces de vie et pièces de service) [53].

Pour optimiser les performances des systèmes de ventilation d'un bâtiment, il est nécessaire de maîtriser les entrées d'air neuf et les extractions d'air vicié. Pour cela, il faut extraire la juste quantité nécessaire d'air vicié en apportant l'équivalent en air neuf, et ainsi limiter les flux d'air non désirés. C'est pour cela que la performance énergétique des bâtiments passe aujourd'hui par l'étanchéité à l'air des enveloppes. En effet, la réglementation thermique française [RT, 2012] a adopté une démarche certifiée de qualité de l'étanchéité à l'air du bâtiment. Les seuils réglementaires sont les suivants :

- $0.6 \text{ m}^3 / (\text{h m}^2)$  pour les maisons individuelles
- $1 \text{ m}^3 / (\text{h m}^2)$  pour les logements collectifs

Les infiltrations de l'air dans un bâtiment s'observent souvent dans certains détails de construction et sont dues à des différences de pression engendrées soit par le vent, soit par l'écart de température de part et d'autre de l'enveloppe extérieure. La (Figure 2.9) illustre les problèmes d'infiltrations qui sont particulièrement importants ( $\pm 20 \%$ ) au droit des portes et des fenêtres, mais aussi aux raccords de toiture, ou au droit des murs non plafonnés.



**Figure 2.9.** Les défauts d'étanchéité des bâtiments sources de courants d'air inconfortables [54].

### 2.3.6. Éclairage

Il existe une autre façon de réduire la consommation d'énergie ou la chaleur présente dans les bâtiments : la réduction des gains internes, particulièrement celle de l'éclairage artificiel. Une bonne gestion de la lumière naturelle, alliée au contrôle de l'éclairage artificiel, peut se traduire par de substantielles économies d'énergie et un plus grand confort visuel. La consommation d'électricité due à l'éclairage artificiel peut être réduite à travers les solutions suivantes [55]:

- Comme il a été mentionné dans la section 2.2, la conception architecturale joue un rôle primordial dans la réduction de l'énergie dissipée par l'éclairage artificiel. En effet, une bonne gestion et l'emplacement des ouvertures permettent de favoriser l'éclairage naturel tout en évitant de provoquer un grand apport solaire en été.
- Gérer l'éclairage des locaux où l'occupation occasionnelle (couloir, escalier, etc.) à l'aide d'un système de détection de présence. Sa rentabilité dépend du temps de coupure supplémentaire par rapport au fonctionnement normal, de la puissance électrique gérée par un détecteur et du coût de l'énergie. La grandeur contrôlée n'ayant pas une variation uniquement liée au temps

(horloge), cette technique permet de ne consommer l'électricité que lorsque c'est nécessaire exemple : éclairage piloté par cellule photoélectrique.

- Utilisation des lampes basses consommations, qui se caractérisent par une faible consommation énergétique et une longue durée de vie (six à quinze fois plus importantes). Ces lampes consomment 5 à 10 fois moins d'énergie que les lampes à incandescence et halogènes (95% de l'énergie utilisée par ces lampes est convertie en chaleur).

Type de lampe	Puissance (W)	Flux lumineux (lm)	Efficacité lumineuse (sans ballast) (lm/W)	Durée de vie moyenne (h)
Incandescente	25 à 500	220 à 8200	9 à 16	1000
Halogène	40 à 2000	500 à 50000	12.5 à 25	2000
Tube fluorescent	14 à 58	1150 à 5200	64 à 104	14000 à 18000
Fluocompacte	5 à 55	200 à 4800	39 à 87	8000 à 13000
Led	2 à 7	5 à 20	50	50000 à 100000

**Tableau 2.3.** Performances des différentes lampes.

A l'échelle nationale l'éclairage représente en moyenne 10 à 15% de la facture totale d'électricité [56]. L'APRUE<sup>4</sup> et onze offices de promotion et de gestion immobilière (OPGI) ont signé en 2009 une convention de partenariat pour l'intégration de l'économie d'énergie dans le secteur de l'habitat en lançant l'opération pilote de diffusion d'un million de lampes économiques dans le cadre du programme "Eco Lumière".

### 2.3.7. La production d'énergie dans le bâtiment

Si la bonne conception du bâtiment peut contribuer à la réduction de l'énergie, les meilleures mesures pour réduire la consommation d'énergie sont les sources d'énergie renouvelables (RES). La promotion de sources renouvelables novatrices et la mise en valeur du marché des RES contribueront à la perpétuation

<sup>4</sup> APRUE : L'Agence nationale pour la promotion et la rationalisation de l'utilisation de l'énergie.

de l'environnement en réduisant la production d'émissions aux niveaux local et mondial. La production énergétique par solaire thermique et/ou photovoltaïque doit nous conduire à considérer le module photovoltaïque et thermique non plus comme unique élément de production d'électricité et/ou de chauffe-eau sanitaire, mais aussi comme composant architectural et élément d'enveloppe répondant aux exigences de la construction de bâtiments environnementaux et énergétiquement autonomes. Il est donc bien de considérer en conception architecturale les dispositifs solaires actifs comme des éléments d'architecture à part entière. Afin d'assurer une intégration architecturale réussie et un emplacement des panneaux solaires qui ne risquent pas d'être à l'ombre due aux masques, un diagnostic de la situation doit être fait pour déterminer les masques du site et leurs coordonnées angulaires. Choisir par la suite l'orientation et l'inclinaison des panneaux qui assurent la bonne productivité [5].

D'autres systèmes sont spécifiques pour la production de l'électricité à partir des éoliennes ou on trouve aussi les unités compactes qui permettent de chauffer ou de refroidir, et purifier l'air provenant de l'extérieur tout en assurant un débit de ventilation hygiénique. Des technologies nouvelles sont en cours d'évaluation comme la cogénération qui consiste à produire simultanément de l'électricité et de la chaleur. Dans la partie suivante nous nous intéressons à quelques-uns de ces systèmes les plus fréquemment utilisés dans le bâtiment.

### **2.3.7.1. Pompe à chaleur**

Les PAC représentent une des manières les plus efficaces de produire de la chaleur ou du froid pour le bâtiment et permettent donc de fournir des éléments pour lutter contre le réchauffement climatique et réduire les consommations d'énergie primaire. En dehors des aspects environnementaux et énergétiques, les PAC sont utilisées prioritairement pour la production de chaleur et pour le chauffage des bâtiments. Ce n'est pas le seul usage, puisque certains fabricants proposent l'installation d'un ballon d'eau chaude capable de récupérer une partie

de la chaleur après le compresseur et avant le condenseur. Cette fonction n'est assurée que pendant la période de chauffage, d'où la nécessité de disposer pour l'été d'une résistance électrique dans le ballon prenant alors le relais. Cette énergie provenant des capteurs extérieurs et de la pompe à chaleur est ensuite transmise à un plancher chauffant basse température [57]. Une pompe à chaleur est basée sur le même cycle thermodynamique à celui rencontré sur les systèmes de production frigorifique. Elle prélève de l'énergie dans un milieu (l'intérieur du réfrigérateur, le sous-sol, l'air extérieur) et elle restitue cette énergie dans un autre milieu à une température plus élevée (échangeur extérieur sur le dos du réfrigérateur, radiateurs, plancher chauffant..).

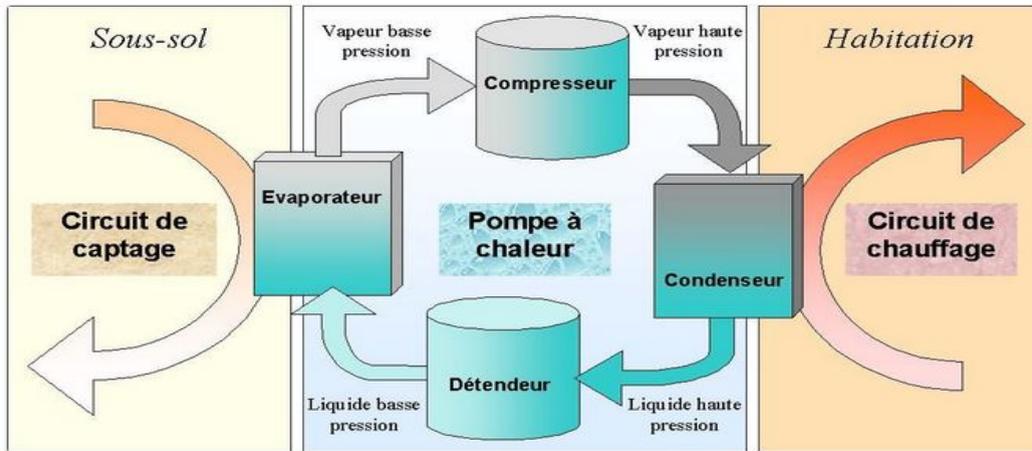


Figure 2.10. Fonctionnement d'une pompe à chaleur

L'efficacité d'une pompe à chaleur est donnée par son coefficient de performance COP pour le mode chaud et EER (Efficiency Efficacy Rate) pour le mode froid. Ce coefficient est le rapport de l'énergie utile sur la quantité d'énergie délivrée. Le COP détermine donc directement la facture d'électricité qui sera nécessaire pour chauffer un bâtiment, par exemple pour une PAC géothermique d'une efficacité moyenne le coefficient de performance COP est de l'ordre de 3. Cela signifie que 2/3 de l'énergie produite pour le chauffage sont fournis par les échangeurs géothermiques. Le reste provient de l'électricité fournie par le compresseur de la PAC [58]. Les pompes à chaleur à captage au sol sont plus efficaces et plus

économiques, comparées aux pompes à chaleur conventionnelles rassemblent la chaleur de l'air ou de l'eau en dehors des maisons et la concentrent pour l'usage à l'intérieur de la maison.

### **2.3.7.2. Systèmes solaires**

Plusieurs systèmes solaires peuvent être intégrés architecturalement aux bâtiments pour produire de la chaleur utile, citons par exemple l'énergie solaire disponible, elle peut être utilisée d'une manière passive via l'enveloppe mais aussi via des systèmes qu'on appelle "le volet actif". Les principaux systèmes sont les suivants :

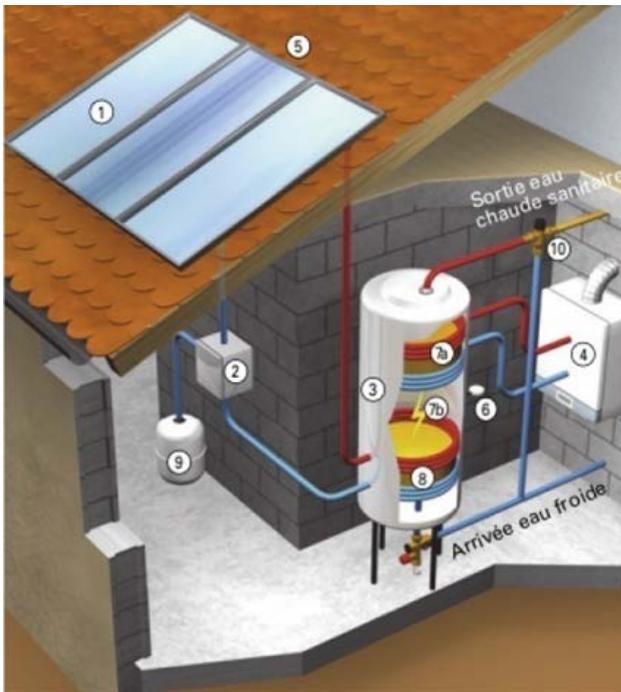
#### **Chauffe-eau Solaire Individuel (CESI)**

Le chauffe-eau solaire individuel (CESI) à circulation forcée comprend des capteurs, placés le plus souvent en toiture, un ballon de stockage (installé généralement à l'intérieur de la maison), un échangeur intégré en partie basse du ballon de stockage, une régulation, un circulateur, une tuyauterie calorifugée qui assure la circulation d'un fluide caloporteur entre l'échangeur du ballon et les capteurs, permettant ainsi de transférer les calories récupérées au niveau des capteurs vers l'eau sanitaire du ballon. Le CESI est complété selon les modèles par un dispositif de chauffage d'appoint. Dans ce cas, cet appoint, qui peut s'avérer nécessaire en période de faible ensoleillement, est fourni à l'installation par un échangeur intégré dans le tiers supérieur du ballon de stockage et raccordé au circuit primaire d'une chaudière ou par une résistance électrique également placée dans la partie supérieure du ballon [59]. Ces systèmes peuvent couvrir jusqu'à 60 % des besoins en eau chaude sanitaire d'un foyer, soit autant d'énergie économisée sans oublier de tenir compte de l'inclinaison et de l'orientation du capteur thermique. La surface de capteurs est fonction du nombre d'occupants du logement.

Nombre d'occupants		1 ou 2	3 ou 4	5 ou 6	7 ou 8
Surface de capteurs (m <sup>2</sup> )		2 à 3	3 à 5.5	4 à 7	5 à 7
Volume du ballon solaire (en litres)	Sans appoint	100 à 150	100 à 250	250 à 350	350 à 500
	Avec appoint	100 à 250	250 à 400	400 à 550	550 à 650

**Tableau 2.4.** Volume du ballon solaire pour un chauffe-eau solaire [19]

Le schéma de principe d'un chauffe-eau solaire individuel à circulation forcée est décrit ci-dessous.



1. Capteur solaire
2. Groupe de transfert (Circulateur, régulation, clapet de non retour, soupape de sécurité...)
3. Ballon de stockage
4. Appoint chaudière
5. Sonde capteur
6. Sonde ballon
7. Appoint hydraulique (7a) et/ou électrique (7b)
8. Échangeur solaire
9. Vase d'expansion
10. Mitigeur thermostatique en sortie ECS.

**Figure 2.11.** Exemple d'un système chauffe-eau solaire individuel.

### Systèmes solaires combinés (SSC)

Le système solaire combiné est plus difficile à mettre en place dans la mesure où l'on a besoin d'eau chaude sanitaire toute l'année alors que l'on a besoin de chauffage qu'à certaines périodes. De même, la température de l'eau utilisée dans le circuit de chauffage est plutôt basse (entre 30 et 50 °C) alors que pour l'eau chaude sanitaire elle est beaucoup plus chaude (entre 45 °C et 60 °C). Des systèmes palliant ces difficultés ont donc vu le jour, tels que l'hydro-accumulation.

Ce système consiste à stocker la chaleur produite par les capteurs dans un volume d'eau tampon dans lequel on vient puiser en cas de besoin. L'énergie indispensable au chauffage est dispersée dans l'habitation soit par des radiateurs basses températures, soit par plancher chauffant, on parlera de plancher solaire direct. Les derniers systèmes SSC sont compacts et relativement faciles à mettre en place. Ils permettent de réaliser jusqu'à 40 % d'économies sur la facture d'énergie.

### **Le plancher solaire direct**

Le plancher solaire est un mode de chauffage de la maison qui est basé sur le même principe que le plancher chauffant. Des capteurs solaires thermiques placés en toiture vont réchauffer un fluide caloporteur, qui va circuler dans un circuit coulé à l'intérieur de la dalle de plancher de la maison. Les avantages de ce système sont nombreux : au lieu de se servir d'un ballon d'eau chaude pour stocker la chaleur, on chauffe directement la dalle de béton qui possède une forte inertie thermique. Cette masse thermique continuera à diffuser pendant toute la nuit la chaleur accumulée pendant la journée. De plus, la température nécessaire pour un chauffage par le sol à basse température est suffisamment faible pour que les capteurs solaires fonctionnent à leur optimum de rendement.

Comme les besoins de chauffage sont concentrés en hiver et en demi-saison, l'inclinaison des panneaux sera plus prononcée que pour un chauffe-eau, afin d'optimiser les apports hivernaux. Même bien optimisé, il est fréquent qu'un chauffage solaire soit couplé à une source d'énergie d'appoint, afin de couvrir les périodes de faible ensoleillement. Une chaudière au bois ou au gaz de faible puissance complète alors l'installation.

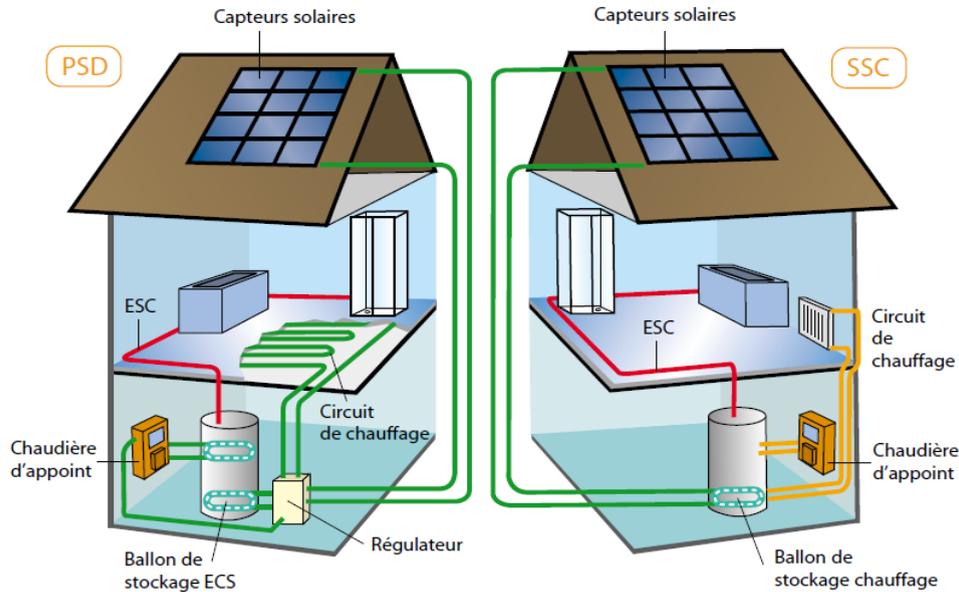


Figure 2.12. Les deux types de systèmes solaires combinés

## 2.4. Conclusion

L'étude de paramétrage du bâtiment et ces systèmes a permis de voir leurs influences significatives sur le comportement énergétique du bâtiment. Nous avons observé que durant les phases initiales de conception, les points à considérer concernant l'enveloppe incluent l'orientation de l'édifice, la morphologie, l'isolation thermique des parois (opaques, translucides) et l'inertie thermique.

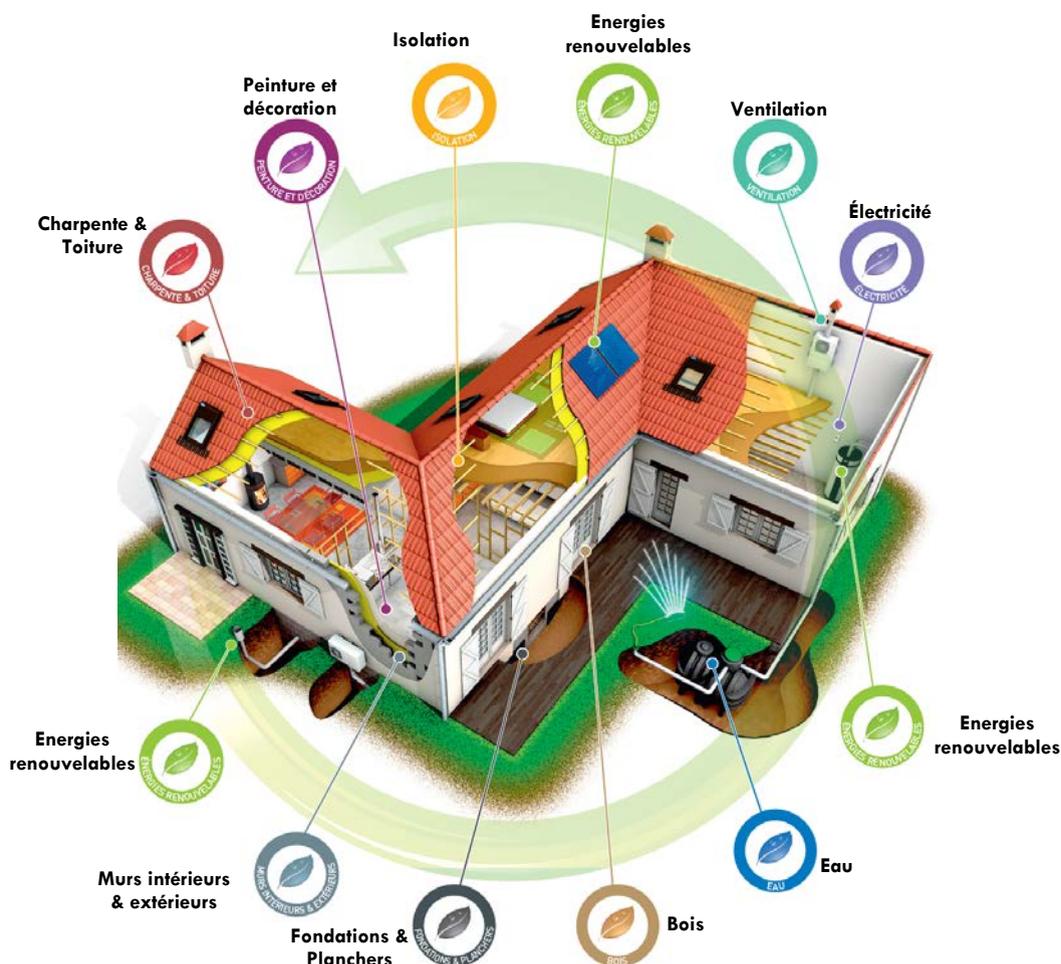
Le niveau d'isolation de tous les points de l'enveloppe doit être le même pour éviter les ponts thermiques (discontinuité dans la couche isolante), ces derniers pouvant compromettre les efforts investis dans l'isolation en causant d'importantes pertes thermiques. Une enveloppe performante se doit de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

Étant donné que le vitrage fait partie des grandes sources de déperdition thermique des bâtiments, choisir un vitrage performant en fonction de l'orientation du bâtiment et des besoins en chauffage est essentiel. C'est pourquoi la priorité lors du choix d'un vitrage sera le captage de l'énergie solaire ou sa conservation (bilan thermique positif) ou les deux. Il faut aussi limiter la surface des ouvertures

pour diminuer les déperditions thermiques, tout en assurant un éclairage naturel des espaces pour le confort des occupants.

Nous pouvons conclure que les principales sources de réduction des consommations énergétiques et/ou émissions de gaz à effet de serre concernent principalement :

- L'efficacité énergétique de l'enveloppe du bâtiment, qui permet de réduire les consommations de chauffage.
- Le développement de moyens de production de chaleur renouvelable, utilisée pour le chauffage et l'eau chaude sanitaire (ECS) : géothermie, ...
- La réduction des consommations de l'éclairage ou de la ventilation par exemple, permettant de réduire les consommations d'électricité spécifique.



**Figure 2.13.** Principales sources de réduction des consommations énergétiques et/ou émissions de gaz à effet de serre [60].

## Références

1. Y. Raffenel, Optimisation du contrôle thermique dans une habitation multi sources, Thèse de Doctorat en Energie et Systèmes, Ecole Centrale de Lyon, 2008.
2. P.O. Goetzberger, A. Schmid, J. Stahl, W., Transparent Insulation of building facades-Steps from research to commercial application, *Solar Energy* 49[5], pp. 413-427, 1992.
3. M. Barbason, La simulation thermo aéraulique du bâtiment validation et développement d'une approche couplée CFD-Multizone pour l'étude de la modélisation du phénomène de surchauffe estivale en Belgique, Thèse de Doctorat en Sciences de l'Ingénieur, Liège, 2014-2015.
4. H. Jeanmart, L. Possoz, Le rêve de croissance économique confrontée à la réalité des limites physiques et technologiques de l'énergie" Premier congrès interdisciplinaire du développement durable, Université catholique de Louvain, Namur, Belgium, 2013.
5. K. Labben, Proposition d'un modèle de processus amont dédié a la conception architecturale climatique basé sur une assistance pars des outils pratique simplifié, Thèse de Doctorat en cotutelle, Université de Tunis EL Manar et Aix Marseille ,2014.
6. P.O. Fanger, Thermal Comfort, Robert E. Krieger, Publishing company, Malabar, Florida, 1982.
7. M. Annabi, A. Mokhtari et T.A. Hafrad, Estimation des performances énergétiques du bâtiment dans le contexte maghrébin 'Revue des Energies Renouvelables Vol. 9 N°2 (2006) 99 - 106.
8. M.D. Watson, K. Labs climatic building design, energy-efficient building principles and practice McGraw Hill Book Company, New York 1983.
9. D.Forgues, D. Monfet, S.Gagnon, Guide de conception d'un bâtiment performant, Fascicule 1, Notions de base et simulation énergétique, Bibliothèque et Archives nationales du Québec, 2016. ISBN : 978-2-550-75339-1 (version PDF).
10. D. Zeroual, Impact des gains de chaleur sur la morphologie des bâtiments, Cas des climats chauds et arides, Thèse de Magistère, option Architecture Bioclimatique, Juin 2006.
11. T. Catalina, J. Virgone, J.J. Roux, E. Blanco, Effet de l'inertie thermique, de la surface vitrée et du coefficient de forme sur les besoins en chauffage d'une habitation, 29 Aug 2009.
12. P. Depecker, C. Menezo, J. Virgone, S. Lepers, Design of building shape and energetic consumption, *Building and Environment* 36 (2001) 627-635.
13. R. Ourghi, A. Al-Anzi, M. Krarti, A simplified analysis method to predict the impact of shape on annual energy use for office buildings, *Energy Conversion and Management* 48 (2007) 300-305.

14. A. AlAnzi, D. Seo, M. Krarti, Impact of building shape on thermal performance of office buildings in Kuwait, *Energy Conversion and Management*, 2008,
15. H. Jedrzejuk, W. Marks, Optimization of shape and functional structure of buildings as well as heat source utilization .Basic theory, *Building and Environment* 2002, 37:1379-1383.
16. Cahier de recommandations environnementales n°1, Comment optimiser les performances énergétiques de votre habitation ?, [www.agglo-valdebievre.fr](http://www.agglo-valdebievre.fr)
17. N. Belkacem, Contribution à l'évaluation des performances énergétiques et environnementales d'un habitat individuel bioclimatique : cas de la maison pilote de Souidania –Alger-(Algérie), Thèse de Doctorat en génie Mécanique, Université Hassiba Benbouali de Chlef, Faculté de Technologie, Avril 2017.
18. A.M. Sierra, Intégration des aspects énergétiques dans la conception du projet architectural une approche méthodologique, Thèse de Doctorat, Spécialité: Mécanique, Sciences et Techniques Architecturales, Université de Bordeaux 1, Décembre 2012.
19. Guide pratique de l'habitat écologique, Mai 2012. [https://www.lehavre.fr/sites/default/files/atoms/files/guide\\_habitat\\_ecolo\\_2012\\_0.pdf](https://www.lehavre.fr/sites/default/files/atoms/files/guide_habitat_ecolo_2012_0.pdf)
20. B.S. Sadineni, S. Madala, F.R. Boehm, Passive building energy savings: A review of building envelope components. In: *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, October 2011. Vol. 15, n° 8, p. 3617- 3631.
21. G. Guarracino, Performance énergétique de l'enveloppe d'un bâtiment et réglementation, École nationale des travaux publics de l'État (ENTPE) Laboratoire des sciences de l'habitat, CNRS. Techniques de l'Ingénieur, traité Génie énergétique, BE 9 065.
22. M.A. Boukli Hacene, Aspects Énergétiques, Économiques et Environnementaux d'une Habitation Écologique, Thèse de Doctorat en physique "Énergétique et Matériaux", Université Abou Bakr Belkaid - Tlemcen, 2013 p15.
23. T. Catalina , Estimation of residential buildings energy consumptions and analysis of renewable energy systems using a multi-criteria decision methodology, doctoral thesis, INSA Lyon, France, 2009 p13 .
24. R. Høseggen, H.M. Mathisen, S.O. Hanssen, The effect of suspended ceilings on energy performance and thermal comfort, *Energy and Buildings*, 2009, 41:234 – 245.
25. Y. Feng, Thermal design standards for energy efficiency of residential buildings in hot summer/cold winter zones, *Energy and Buildings*, 2004, 36:1309–1312.
26. L. Chahwane, Valorisation de l'inertie thermique pour la performance énergétique des bâtiments, Thèse de Doctorat, Université de Grenoble, spécialité : Génie Civil et Sciences de l'Habitat, soutenue en octobre 2011.

27. A. Aissani, Optimisation fiabiliste des performances énergétiques des bâtiments, Thèse de Doctorat en Matériaux, Structures, Fiabilité, Université Blaise Pascal - Clermont Ferrand II École Doctorale, Sciences Pour L'ingénieur, Mars 2016, p131.
28. M. Ozel, Cost analysis for optimum thickness and environmental impacts of different insulation materials. *Energy and Buildings*, 49:552–559, 2012.
29. F. Ascione, F. Rossi, G.P. Vanoli, Energy retrofit of historical buildings: theoretical and experimental investigations for the modeling of reliable performance scenarios. *Energy and Buildings*, 43:1925–1936, 2011.
30. F. Dominguez-Munoz, B. Anderson, J.M. Cejudo-Lopez, A. Carrilo-Andrès, Uncertainty in the thermal conductivity of insulation materials, *Energy and Buildings*, 42:2159–2168, 2010.
31. M.A. Aktacir, O. Buyukalaca, T. Yilmaz, Life cycle cost analysis for constant air-volume and variable-air-volume air-conditioning systems, *Applied Energy*, 83: 606–627, 2006.
32. B.P. Jelle, Traditional, state-of-the-art and future thermal building insulation materials and solutions- properties, requirement and possibilities, *Energy and Buildings*, 43 :2549– 2563, 2011.
33. C.J. Hopfe, J-L.M. Hensen, Uncertainty analysis in building performance simulation for design support. *Energy and Buildings*, 43:2798–2805, 2011.
34. A. Ucar, F. Balo, Determination of the energy savings and the optimum insulation thickness in the four different insulated exterior walls, *Renewable Energy*, 35:83–98, 2010.
35. T.M.I. Mahlia, A. Iqbal, Cost benefits analysis and emission reductions of optimum thickness and air gaps for selected insulation materials for building walls in Maldives, *Energy*, 35:2242–2250, 2010.
36. O. Kaynakli, A review of the economical and optimum thermal insulation thickness for building applications, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16: 425–425, 2012.
37. M.J. Tenpierik, E. Hasselaar, Reflective multi-foil insulation for buildings: A review. *Energy and Buildings*, 56:233–243, 2013.
38. M.A. Medina, On the performance of radiant barriers in combination with different attic insulation levels. *Energy and Buildings*, 40:438–444, 2008.
39. L.F. Cabeza, A. Castell, M. Medrano, I. Martorell, G. Pérez, I. Fernandez, Experimental study on the performance of insulation materials in Mediterranean construction. *Energy and Buildings*, 42:31–55, 2010.
40. T. Gallauziaux, D. Fedullo, L'isolation par l'extérieur, livre Editeur (s): Eyrolles, Collection : Les cahiers du bricolage, copyright 2015.
41. I. Benoudjafer, F. Ghomari et A. Mokhtari, Etude comparative relative à l'efficacité énergétique de deux appartements situés à Béchar, Algérie, *Revue des Energies Renouvelables* Vol. 15 N°1 (2012) 1-12.

42. I. Benoudjafer, 'Rapport de Stage Professionnel, Groupe de Sociétés Hasnaoui', Sidi Bel Abbés, Algérie, 25 p., Juin 2010.
43. F. Wolfgang, P. Søren et G. Manfred, Final Technical Report, CEPHEUS-Project information, n°36, Hanovre, juillet 2001.
44. B.P. Jelle, A. Hynd, G. Arild, D. Arasteh, H. Goudey, R. Hart, Fenestration of today and tomorrow: A state-of-the-art review and future research opportunities. In: Solar Energy Materials and Solar Cells, Janvier 2012, Vol. 96, p. 1-28.
45. ISO 10211: 2007 thermal bridges in building construction-international standards, 2007.
46. T.G. Theodosiou, A.M. Papadopoulos, The impact of thermal bridges on the energy demand of buildings with double brick wall constructions, Energy Build, 40 (2008) 2083–2089.
47. S.A. Al Sanea, Finite-volume thermal analysis of building roof under two dimensional periodic conditions. Building and Environment, 38:1039–1049, 2003.
48. M.L. Persson , A. Roosa, M. Wall, Influence of window size on the energy balance of low energy houses, Energy and Buildings, Volume 38, Issue 3, Pages 181-188.
49. F. Gloriant, P. Tittlein, A. Joulin, S. Lassue, Modeling a triple-glazed supply-air window, In: Building and Environment, Janvier 2015.Vol. 84, p. 1-9.
50. Z. Romani, Développement d'une méthode d'aide a la décision multicritère pour la conception des bâtiments neufs et la réhabilitation des bâtiments existants a haute efficacité énergétique, Thèse de Doctorat en Cotutelle, Spécialité : Énergétique du Bâtiment, Université Abdelmalek Essaâdi -Maroc Université de La Rochelle France, 2015.
51. E. Cuce, S.B. Riffat, A state-of-the-art review on innovative glazing technologies. In: Renewable and Sustainable Energy Reviews, Janvier 2015, Vol 41, p. 695-714.
52. H. Lamy, R. baur, R. Beuhorry, D. Bush, J. Clement, A. Danieli, Y. Debiez, G. Dutoo, P. Norde, G. Tröscher, guide "La protection solaire dans les bâtiments à basse consommation", Comment les fermetures et les stores réduisent les besoins énergétiques des bâtiments et améliorent leur confort thermique et visuel, Février 2012.
53. M. Rahmeh, Etude expérimentale et numérique des performances de la ventilation mécanique par insufflation: qualité de l'air intérieur dans les bâtiments résidentiels, Thèse de Doctorat en Génie Civil, Université de La Rochelle – UFR Science et Technologie Laboratoire des Sciences de l'Ingénieur pour l'Environnement, 2014.
54. A. Leibard, A.D. Herde, Traité d'Architecture et D'urbanisme bioclimatique, concevoir, édifier et aménager avec le développement durable, 2006.Edition le moniteur, ISBNB : 2-913620-37-X.
55. I. Sobhi, Modélisation dynamique et monitoring d'une maison moderne à Marrakech: propositions pour améliorer ses performances énergétiques, Thèse de Doctorat en

physique Université Cadi Ayyad, Laboratoire des Energies Renouvelables et Efficacité Énergétique (EnR2E).

56. Programme des énergies renouvelables et de l'efficacité énergétique, Mars 2011.  
[https://portail.cder.dz/IMG/pdf/Programme\\_des\\_energies\\_renouvelables\\_et\\_de\\_l\\_efficacite\\_energetique\\_FR.pdf](https://portail.cder.dz/IMG/pdf/Programme_des_energies_renouvelables_et_de_l_efficacite_energetique_FR.pdf)
57. V. Brigitte, Choisir une énergie renouvelable adaptée à sa maison, Edition Eyrolles, 2006, Code éditeur: G12142 ,ISBN : 978-2-212-12-12142-1.
58. P. Riederer, F.Dastot, Guide Pratique, Pompe à chaleur géothermique, Edition CSTB 2012, ISBN : 979-10-206-0001-1.
59. D. Caccavelli, F. Cheutin, T. Bel, Guide Pratique chauffe-eau solaire individuel (CESI), Edition CSTB 2012, ISBN : 978-2-86891-415-6.
60. Guide Eco Matériaux, Démarche HQE, Solution produits, Normes et labels, BigMat, <https://www.calameo.com/books/0024305441c0a31a552ac>.

# **Chapitre 3**

## **Déperditions, Confort Thermique et Bilan Énergétique**

## 3. Déperditions, Confort Thermique et Bilan Energétique

### 3.1. Introduction

Les enjeux économiques et écologiques liés à la réduction de la consommation énergétique des bâtiments sont de plus en plus importants. En effet, le secteur du bâtiment compte parmi les secteurs les plus énergivores avec près de 45% de la consommation mondiale. Dans le but de réduire la facture énergétique et les impacts environnementaux liés aux bâtiments, plusieurs organismes et laboratoires de recherche se sont intéressés à l'étude de la physique du bâtiment, de sa performance énergétique et de la qualité des espaces habitables [1].

Dans ce chapitre, nous donnons brièvement quelques rappels sur les différents modes de transfert de chaleur par conduction, par convection et par rayonnement rencontrés généralement dans le bâtiment. En général, ces trois modes de transfert interviennent simultanément (cas à l'intérieur d'un local). Toutefois, on peut très fréquemment considérer que l'un des modes est prépondérant ou qu'ils peuvent être découplés et traités séparément [2].

Nous présentons aussi les phénomènes physiques à prendre en considération pour réaliser un bilan énergétique complet d'un bâtiment. Ainsi, nous allons présenter les différents types des déperditions d'un bâtiment à savoir les déperditions par transmission et par renouvellement d'air. Nous présentons ensuite les différents apports énergétiques (solaires et internes), qu'on les appelle généralement les gains et qui permettent de réduire les besoins énergétiques de chauffage en hiver.

Ces apports gratuits en hiver deviennent évidemment une charge supplémentaire en période de climatisation (estivale). Quelques notions relatives au bilan énergétique du corps humain et du confort hygrothermique vont être aussi présentées.

### 3.2. Comportement thermique d'un bâtiment

La température intérieure des bâtiments est adaptée en fonction de l'activité, de l'habillement usuel, du temps de séjour dans un local et du niveau de confort demandé. Ainsi tout bâtiment sera divisé en plusieurs zones, chacune ayant une température et un niveau de confort différent de l'autre. Parmi les nombreux objectifs de cette démarche, on cherche notamment à évaluer les besoins de chauffage et/ou de refroidissement du bâtiment afin d'optimiser la conception de son enveloppe. La température de consigne définit le confort souhaité par l'occupant en chauffage ou en climatisation. Elle dépend de facteurs liés à l'architecture et aux conditions d'occupation du bâti. Les paramètres agissant sur l'augmentation de la température d'un bâtiment sont déterminés afin de pouvoir se prémunir de ces chaleurs indésirables en termes de confort thermique [3]:

- La température moyenne extérieure qui dépend du site (données climatologiques)
- Les apports internes et solaires
- La variation diurne de la température
- L'inertie du bâtiment

La figure 3.1 montre comment se décompose le comportement thermique d'un local et la façon qui traduit l'action sur les paramètres cités sur le diagramme : l'action sur la morphologie du bâtiment (forme architecturale), la protection contre le rayonnement solaire (isolation thermique et protections solaires), la minimisation des gains internes, la dissipation des surchauffes et le refroidissement des locaux en tirant partie de l'environnement.

Un bâtiment est un ensemble complexe de matériaux en contact avec un environnement aux températures fluctuantes. C'est également un lieu que l'homme occupe plus de 80 % de son temps au cours de sa vie. Au-delà des performances thermiques auxquelles un bâtiment doit répondre aujourd'hui, il doit s'intégrer parfaitement aux contraintes de son environnement, tout en le respectant, et offrir à ses usagers un confort optimum à chaque saison [4]. L'étude du comportement thermique d'un bâtiment repose avant tout sur une description physique appropriée des transferts de chaleur entre les différents éléments d'un bâtiment.

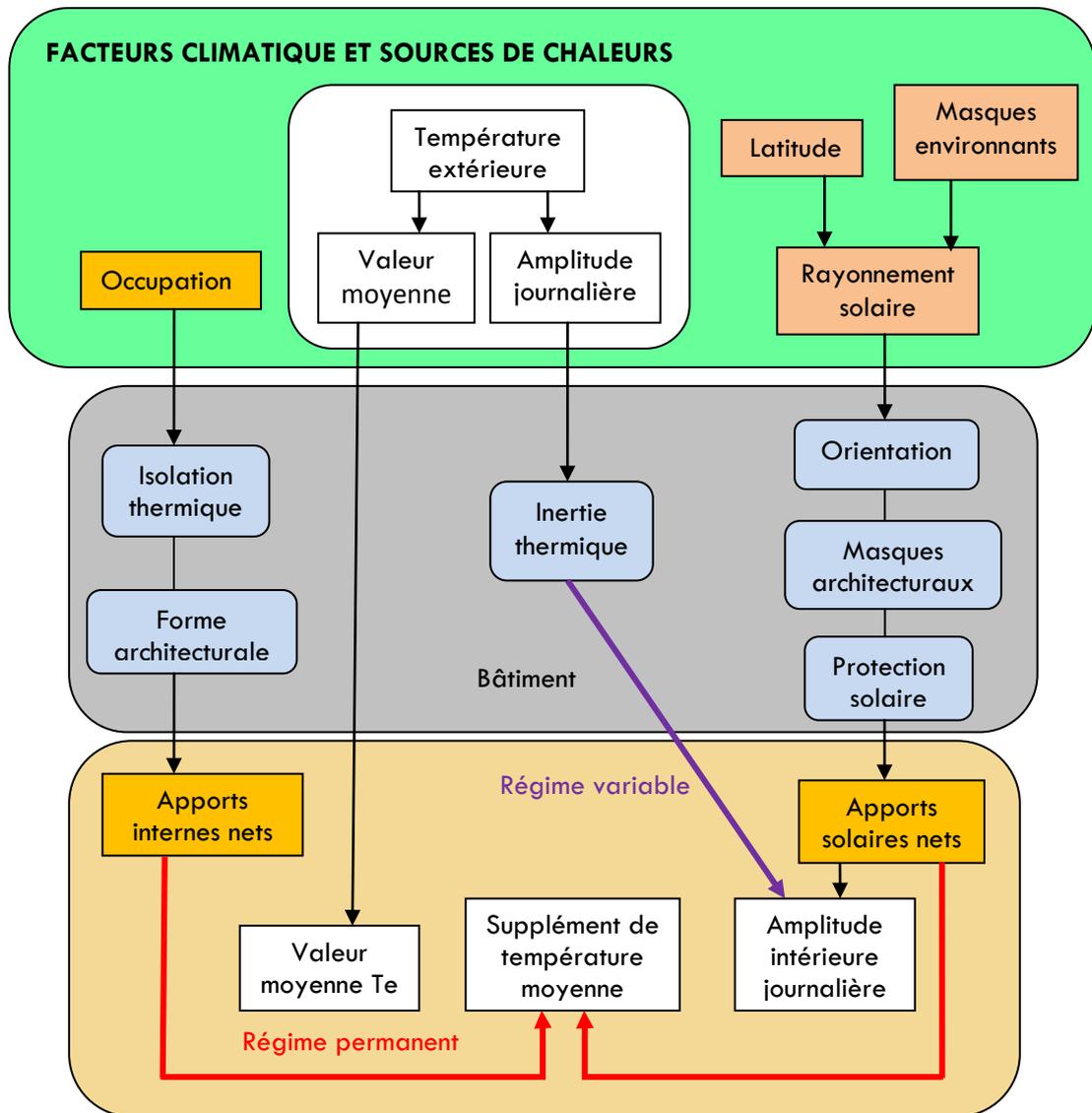
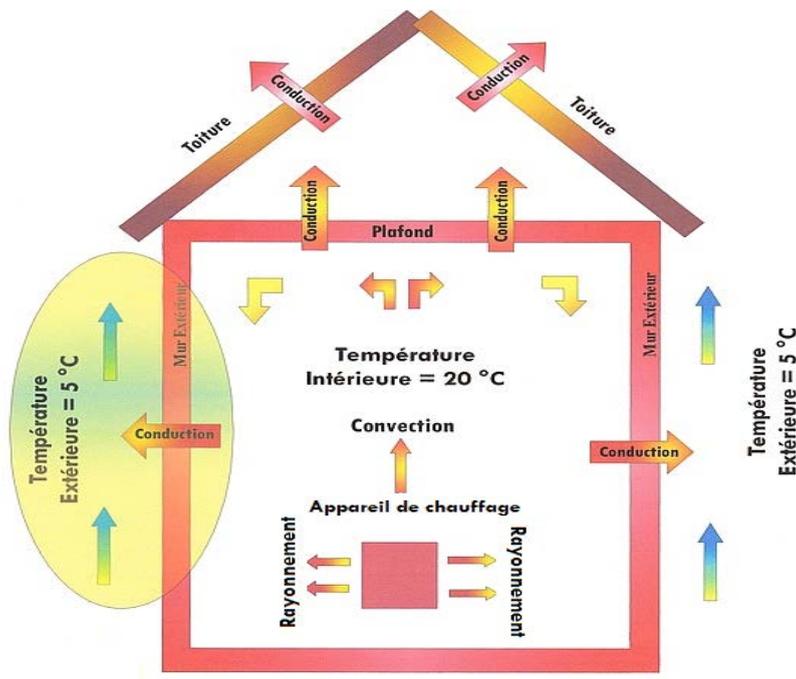


Figure 3.1. Paramètres agissant sur la température d'un local [3].

### 3.2.1. Transfert de chaleur par transmission

Du point de vue physique le bâtiment est une enveloppe composée d'une multitude de parois opaques et transparentes. Il constitue le lien entre le microclimat intérieur et les fluctuations des sollicitations climatiques. La morphologie, l'orientation, et l'organisation des espaces caractérisent les modalités des interactions et transferts d'énergie entre l'intérieur et l'extérieur. Les transferts d'énergie sont essentiellement des transferts de masse et de chaleur. Dans cette partie, les principaux modes d'échange de chaleur : la conduction, la convection et le rayonnement sont étudiés séparément mais il faut savoir qu'ils sont en général interdépendants et qu'ils se présentent simultanément dans les problèmes pratiques.



**Figure 3.2.** Mécanisme des mouvements thermiques dans une habitation.

Ces mécanismes opèrent jusqu'à l'équilibre des températures entre l'intérieur et l'extérieur. Les températures varient en permanence, donc le gradient de température est toujours changeant; entre la nuit et le jour; entre l'été et l'hiver, etc.

### 3.2.1.1. Transfert de chaleur par conduction [5]

La conduction est le processus de transmission de la chaleur par diffusion dans les solides. On s'attachera à présenter l'équation de la chaleur, dans sa forme unidirectionnelle, c'est-à-dire décrivant le transfert de chaleur au travers d'un mur plan. Considérons alors un système d'épaisseur  $dx$  dans la direction  $x$  et de section d'aire  $S$  normalement à la direction  $(Ox)$ . Le bilan d'énergie sur ce système (Premier principe de thermodynamique) s'écrit :

$$\varphi_{c,x} + \varphi_g = \varphi_{st} + \varphi_{c,x+dx} \quad (3.1)$$

$\varphi_{c,x}$  désigne le flux thermique conductif entrant en  $x$ , selon la loi de Fourier

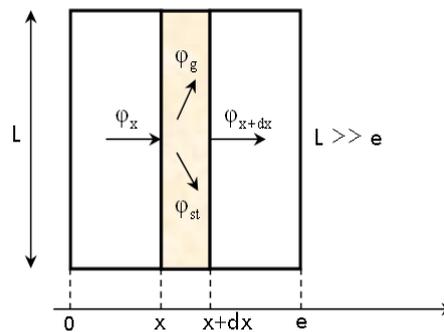


Figure 3.3. Bilan d'énergie pour un mur plan

$$\varphi_{c,x} = -\lambda S \frac{\partial T}{\partial X} \Big|_x \quad (3.2)$$

$\varphi_{st}$  est le flux de chaleur stocké par le corps (augmentation de son énergie interne au cours du temps)

$$\varphi_{st} = \rho \cdot c \cdot s \cdot dx \frac{\partial T}{\partial t} \quad (3.3)$$

$\varphi_{c,x+dx}$  est le flux thermique conductif sortant en  $x+dx$  (W),

$$\varphi_{c,x+dx} = -\lambda S \frac{\partial T}{\partial X} \Big|_{x+dx} \quad (3.4)$$

$\varphi_g$  représente le flux d'énergie thermique générée (W),

$\varphi_g = \dot{q} \cdot s \cdot dx$  (terme source) ;

$\rho$  : Masse volumique du matériau ( $\text{Kg m}^{-3}$ );

$c$  : Chaleur massique du matériau ( $\text{J Kg}^{-1}\text{K}^{-1}$ );

$S$  : Aire de la section de passage du flux de chaleur;

$x$  : Variable d'espace dans la direction du flux (m);

$\lambda$  : Conductivité thermique du milieu ( $\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ )

$\dot{q}$  : Densité volumique d'énergie générée ( $\text{Wm}^{-3}$ ).

En reportant ces expressions dans le bilan d'énergie et en divisant par  $dx$ , nous obtenons l'équation de la chaleur en 1D :

$$\frac{\partial}{\partial x} \lambda \frac{\partial T}{\partial x} + \dot{q} = \rho c \frac{\partial T}{\partial t} \quad (3.5)$$

### 3.2.1.2. Transfert de chaleur par convection [5]

La convection thermique est le mode de transmission associé au déplacement d'un fluide, liquide ou gazeux. Dans un fluide, il est pratiquement impossible d'assister de la conduction pure car le moindre gradient de température entraîne des courants de convection, c'est-à-dire un transport de masse. Dans le domaine du bâtiment en particulier, on distingue deux types de convection: la convection naturelle (ou encore convection libre) et la convection forcée (ventilation). La convection naturelle apparaît spontanément, elle se produit dans un fluide au sein duquel existe un gradient de température. C'est le cas dans une pièce où l'air chaud produit au niveau du sol va monter au plafond tandis que l'air froid va descendre. Le mouvement est dû au fait que l'air chaud est moins dense que l'air froid et monte donc sous l'effet d'une force d'Archimède. La convection forcée se produit quand le mouvement du fluide est imposé par une intervention extérieure, par exemple une pompe ou un ventilateur. La convection est un phénomène très

complexe où la thermique et la mécanique des fluides sont couplées. Si l'on aborde le problème d'un point de vue pratique, la convection est traitée grâce à des formules semi-empiriques. La température sera modifiée dans une couche très faible près de la surface. On introduit alors le concept de couche limite notée  $k$  telle que le flux d'énergie par convection  $\varphi_{cv}$  à la surface s'écrive :

$$\varphi_{cv} = -\lambda_f S \frac{T_a - T_s}{k} h_s (T_s - T_a) \quad (3.6)$$

$\varphi_{cv}$  : Flux de chaleur par convection (W)

$h_s$  : Coefficient d'échange de chaleur par convection ( $W m^{-1} K^{-1}$ )

$S$  : Aire de la surface en contact ( $m^2$ )

$\lambda_f$  : Conductivité thermique du fluide ( $W m^{-1} K^{-1}$ )

$T_a$  : Température du fluide loin de la paroi (K)

$T_s$  : Température de surface (K)

$k$  : L'épaisseur de la couche (m)

Cette équation est appelée loi de Newton où  $h_s$  représente le coefficient de transfert convectif. En pratique, ce coefficient dépend des températures du fluide et du solide, de la nature de l'écoulement (laminaire ou turbulent), des propriétés du fluide (viscosité, coefficient de dilatation thermique, densité) et de la géométrie locale (aspect granuleux ou lisse du matériau) et globale (évacuation de l'air facilitée). L'épaisseur de la couche  $k$  dépend du type d'écoulement du fluide au voisinage de la paroi.

### 3.2.1.3. Transfert de chaleur par rayonnement

Le rayonnement thermique est défini comme le processus d'émission d'ondes électromagnétiques par un corps au détriment de son énergie calorifique. Ce mode de transfert entre deux surfaces ne nécessite pas de support matériel solide ou fluide et peut donc se produire dans le vide. Dans la pratique, le rayonnement s'effectue en présence d'un gaz, c'est la raison pour laquelle le

rayonnement est rarement le seul type d'échange thermique mis en jeu : la convection et la conduction sont également présentes. Cependant aux hautes températures, le rayonnement prend une importance prépondérante. On peut exprimer le phénomène global du rayonnement de la façon suivante. Considérons sur la figure 3.4 un mur de surface  $S$  dont les deux faces sont respectivement maintenues aux températures  $T_1$  et  $T_s$  avec  $T_1 > T_s$ . Ce mur est donc soumis à un phénomène de conduction, on suppose que seule la surface située à droite échange de la chaleur par rayonnement avec le milieu ambiant à la température  $T$ . D'après la loi de Stefan-Boltzmann, le flux de chaleur émis par rayonnement depuis la surface  $S$  vers le milieu ambiant peut s'écrire comme suit [5]:

$$\varphi_r = \varepsilon \sigma h_s T_s^4 - T_{am}^4 \quad (3.7)$$

$\varphi_r$  : Flux de chaleur émis par rayonnement (W)

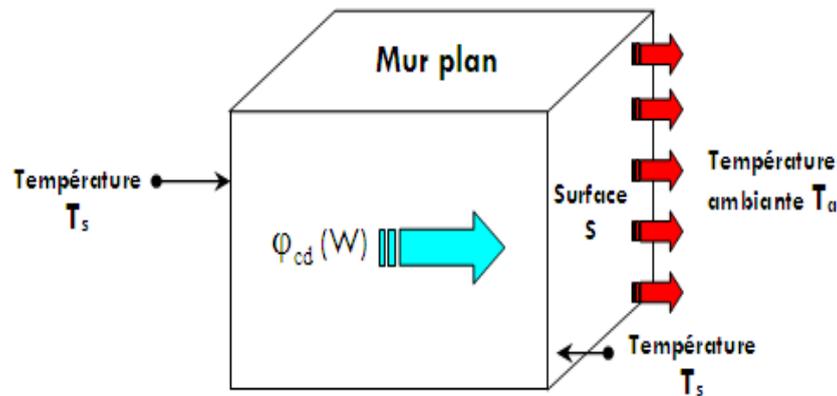
$S$  : Surface d'échange ( $m^2$ )

$\varepsilon$  : Émissivité du corps (= 1 pour un corps noir, < 1 pour un corps gris)

$\sigma$  : Constante de Stefan-Boltzmann =  $5,67.10^{-8} \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-4}$

$T_s$  : Température de surface du corps (K)

$T_{am}$  : Température de l'air ambiant (K)



**Figure 3.4.** Transfert de chaleur par rayonnement au sein d'une paroi verticale [6].

L'expression du flux de chaleur échangé par rayonnement est non linéaire, elle fait intervenir la température à la puissance quatrième. Cependant, lorsque la différence de température entre deux surfaces en regard  $T_2 - T_1$  est faible, la relation 3.7 peut être linéarisée, on introduit ainsi un coefficient d'échange radiatif  $h_r$  tel que [5]:

$$\phi_r = h_r s (T_2 - T_1) \quad (3.8)$$

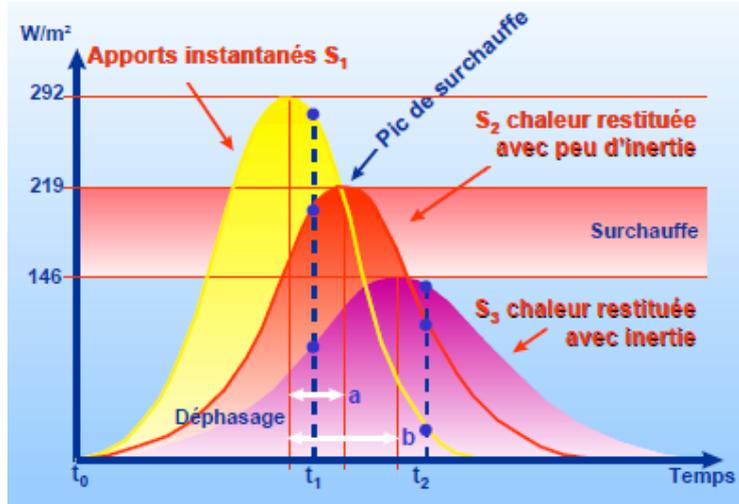
### 3.2.2. L'inertie thermique des matériaux: stockage et restitution de la chaleur

Les parois qui composent l'enveloppe des bâtiments sont le siège de transferts thermiques complexes dus au couplage des différents modes. Afin de garder un peu de chaleur pour les nuits froides, une forte inertie est prescrite pour les bâtiments à faible inertie<sup>1</sup>. Cette inertie doit être suffisante pour lisser les températures intérieures en période d'occupation. Il n'empêche que cette chaleur captée et stockée doit être conservée. La figure 3.5 compare la réponse d'un bâtiment à forte inertie (masse surfacique des parois  $> 400 \text{ kg/m}^2$ ) à celle d'un bâtiment à faible inertie (masse surfacique  $< 150 \text{ kg/m}^2$ ) en présence d'un apport de chaleur par rayonnement solaire. La surface jaune  $S_1$  représente l'évolution dans le temps de l'offre solaire. La surface  $S_2$  représente la réponse du local à faible inertie et la surface  $S_3$ , celle du local à forte inertie.

Dans un bâtiment avec lequel on cherche à optimiser les apports solaires, le stockage de cette énergie, qui est concentrée sur quelques heures de la journée, reste vital. Ce stockage repose sur l'inertie thermique des éléments lourds à l'intérieur du volume à chauffer.

---

<sup>1</sup> Selon la période de construction, les bâtiments existants disposent d'une inertie suffisante, c'est par exemple le cas des logements anciens en pierres.



**Figure 3.5.** Réaction d'un local à inertie forte et d'un local à inertie faible en présence d'apports solaires [7]

La notion d'inertie thermique n'est pas facile à appréhender. La plupart du temps, elle est définie comme étant la vitesse avec laquelle le bâtiment réagit à des perturbations extérieures. La réponse du bâtiment face aux sollicitations dépend en grande partie des propriétés thermiques des matériaux qui le constituent. Les matériaux les plus performants pour un stockage de l'énergie sont ceux qui disposent de la plus forte chaleur spécifique, tels que le béton, la pierre, la brique, le plâtre... La chaleur spécifique étant sa capacité à emmagasiner la chaleur par rapport à son volume.

On parle d'inertie intérieure pour la capacité de la face interne d'une paroi à absorber, stocker et restituer les calories, et d'inertie de transmission pour l'épaisseur totale qui amortit et déphase les variations de température entre l'intérieur et l'extérieur. L'amortissement des variations de température correspond à la réduction d'amplitude.

Les rayons du soleil qui frappent les parois ou entrent dans le bâtiment atteignent une surface qui les réfléchit. Selon la couleur et la nature des matériaux, la partie non réfléchiée des rayons est plus ou moins absorbée sous forme de chaleur. Un matériau très réfléchissant comme l'aluminium poli ne s'échauffe quasiment pas. A l'inverse, l'ardoise de couleur noire absorbe

pratiquement la totalité du rayonnement sous forme de chaleur. Les matériaux capables d'absorber une quantité importante des calories reçues sont ceux dont la capacité thermique est grande. D'après leurs capacités à stocker et à véhiculer la chaleur, le bâtiment réagira différemment, d'où le problème couplé de la conductivité et de la capacité thermique, ce qui conduit à l'introduction des deux notions de diffusivité et d'effusivité.

### 3.2.2.1. Conductivité thermique

La conductivité thermique est une caractéristique constante intrinsèque aux matériaux homogènes qui représente l'aptitude du matériau à se laisser traverser par la chaleur. Elle est égale à la quantité de chaleur qui traverse un mètre d'épaisseur de ce matériau par seconde et par mètre carré de surface, lorsque la différence de température entre les deux faces du matériau est de 1 K. Elle s'exprime en W/m K. Plus la conductivité est faible plus un matériau est isolant. Le tableau 3.1 indique, pour quelques matériaux du bâtiment, les valeurs de conductivité thermique en condition sèche et en condition humide. Celle des matériaux isolants n'est donnée qu'en condition sèche car il est déconseillé de les utiliser là où ils pourraient s'humidifier (condensation, vapeur d'eau, etc.). Leur performance isolante décroîtrait alors très sensiblement. Les métaux, matériaux non poreux, ont une conductivité thermique constante.

	Conductivité thermique $\lambda$ en W/m K		
	sec	hum	
Matériaux isolants	0.028		Polyuréthane
	0.040		Laine minérale, liège
Bois et dérivés	0.17	0.19	Feuillus durs
Maçonneries	0.27	0.41	Briques 700-1000 kg/m <sup>3</sup>
Verre	1.0	1.0	
Béton armé	1.70	2.2	
Métaux		203	Aluminium
		384	Cuivre

**Tableau 3.1.** Valeurs de la conductivité thermique pour quelques matériaux du bâtiment [7].

Le facteur clé influant sur la conductivité thermique d'un isolant est sa masse volumique. Une relation linéaire permet d'exprimer le lien entre la conductivité  $\lambda$  et la masse volumique moyenne  $\rho$ . La partie conductrice de la conductivité thermique totale est la somme de la conductivité de l'air (constante) et de la conductivité de la matrice solide qui augmente avec la masse volumique [8] :

$$\lambda_{\text{conduction}} = a + b\rho \quad (3.9)$$

Enfin, si on considère la partie radiative de la conductivité, Dominguez-Munoz et al. [8] ont constaté qu'elle est une fonction réciproque de la masse volumique  $\lambda_{\text{rad}} = c/\rho$  ce qui nous donne une conductivité totale de la forme :

$$\lambda = a + b\rho + c/\rho \quad (3.10)$$

### 3.2.2.2. Capacité thermique

La capacité thermique d'un matériau représente sa propension à emmagasiner de la chaleur en fonction de son volume. Elle est exprimée en  $\text{kJ/m}^3 \text{ } ^\circ\text{C}$ . Plus la capacité thermique d'un matériau est grande, plus ce matériau sera capable d'emmagasiner et de restituer de la chaleur en hiver ou de la fraîcheur en été. Le principal bénéfice d'une forte capacité thermique est de lisser les variations de température d'un bâtiment. Cependant, si la capacité thermique peut être l'allié du confort et de la sobriété énergétique d'un bâtiment, elle peut être pénalisante dans certains cas [9]. Il est à noter que pour avoir un stockage thermique efficace, la variation de la température ambiante diurne devrait dépasser  $10 \text{ } ^\circ\text{C}$  [10]. Des études ont montré que le passage d'une inertie faible à une inertie forte peut réduire d'environ 10% la demande de chauffage et de 20% la demande de refroidissement [11].

### 3.2.2.3. Diffusivité thermique

La diffusivité thermique d'un matériau caractérise la vitesse de diffusion de la chaleur en son cœur. Elle est exprimée en  $m^2/s$ . Plus la diffusivité est élevée plus le matériau s'échauffe et se refroidit rapidement. La diffusivité est directement liée à la conductivité thermique, à la capacité thermique ainsi qu'à la masse volumique d'un matériau:

$$\alpha = \frac{\lambda}{\rho c} \quad (3.11)$$

$c$  : Capacité thermique massique du matériau (en  $J \text{ kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$ )

$\rho$  : La masse volumique du matériau (en  $\text{kg m}^{-3}$ )

$\lambda$  : Conductivité thermique ( $\text{W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$ )

Plus le matériau a une conductivité élevée et une faible capacité thermique, plus la diffusivité est élevée. Appliquée à un bâtiment, la diffusivité d'un matériau d'une paroi permet de gérer le temps de restitution de la chaleur. Par exemple, elle permet de dimensionner l'épaisseur d'un mur accumulateur qui capte des calories la journée et les restitue quelques heures plus tard vers une pièce de vie nocturne. Le déphasage ainsi créé est un paramètre essentiel dans l'optimisation du confort d'été d'une habitation. Un fort déphasage permet de décaler dans le temps un pic de température. Une forte chaleur d'une journée d'été atteint l'intérieur du bâtiment 12 heures après avoir impacté les faces extérieures. Il est donc possible d'évacuer ce surplus de calories en surventilant le bâtiment et ainsi de limiter l'inconfort thermique dans les pièces [9].

### 3.2.2.4. Effusivité

L'effusivité d'un matériau, appelé couramment chaleur subjective, est la capacité d'un matériau à absorber l'énergie et la restituer. Elle évolue en fonction de la conductivité thermique et de la capacité thermique et s'exprime en  $J/m^2 \text{ S } ^\circ\text{C}$ . À la différence de la diffusivité thermique qui décrit la rapidité du

déplacement de la chaleur à travers la masse d'un matériau, l'effusivité décrit la rapidité avec laquelle un matériau absorbe la chaleur. Ainsi une effusivité élevée limite les valeurs du gradient de température. Par exemple, sous un climat froid, un parquet à chaleur subjective élevée sera utilisé dans les chambres; à l'inverse, sous un climat chaud, un carrelage donnera une impression de fraîcheur à la chambre. L'effusivité peut permettre d'atténuer les inconvénients liés à un bâtiment à forte inertie en le rendant plus confortable dès le début de la période de chauffe.

$$E = \sqrt{\lambda \rho c} \quad (3.12)$$

La diffusivité et l'effusivité thermiques donnent une information importante sur la transmission de la chaleur à l'échelle d'un matériau. Lorsqu'on passe à l'échelle des parois multicouches, l'assemblage des matériaux a aussi une influence non négligeable qui modifie totalement le comportement énergétique global de celles-ci. On introduit alors d'autres paramètres servant à les caractériser comme l'admittance, le déphasage, la constante de temps et la capacité calorifique [9].

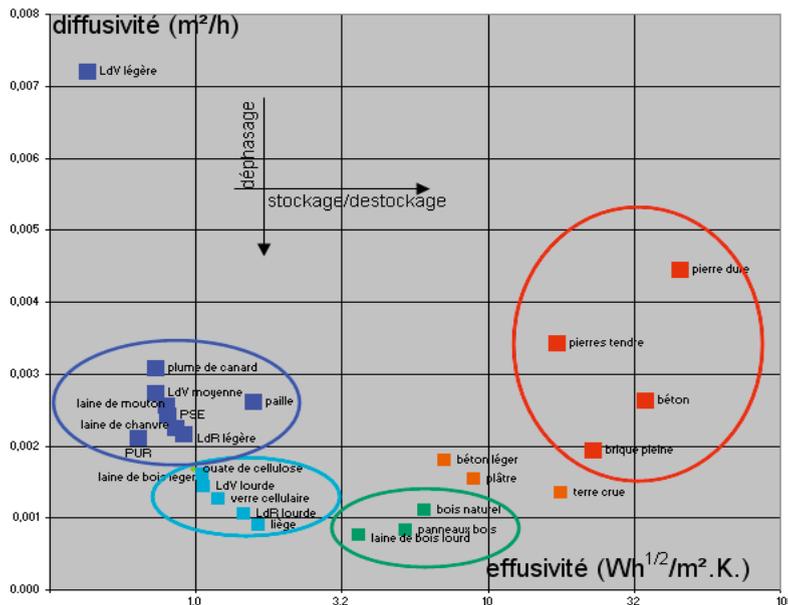


Figure 3.6. Choix des matériaux sur les 2 inerties [12].

Pour certaines conditions, une forte inertie pourrait s'avérer bénéfique, notamment pour stocker une partie des apports afin de les restituer au bâtiment lorsqu'il en a le plus besoin. D'autres traités d'architecture bioclimatique [13,14] dressent les mêmes constats : dans les climats tempérés, les solutions privilégiées pour l'hiver et l'été s'opposent, mis à part l'utilisation de l'inertie du bâtiment comme déphaseur. L'analyse globale ne permettant pas de visualiser les évolutions dynamiques, une analyse temporelle est nécessaire afin de mieux comprendre les phénomènes inertiels et de stockage d'énergie dans le bâtiment. Cette analyse doit également permettre de préciser les contours des besoins de stockage d'énergie à court terme pour une exploitation optimale des ressources de l'environnement [15].

### 3.2.3. Transfert de chaleur à travers les parois de l'enveloppe

Les caractéristiques thermiques dynamiques d'un composant de bâtiment décrivent son comportement thermique lorsqu'il est soumis à des conditions aux limites variables, à savoir flux thermique ou température variable sur l'une de ses faces ou sur les deux [16]. Alors si on désire optimiser le confort tout en minimisant la consommation d'énergie achetée, il est nécessaire de comprendre où passent les flux de chaleur et de connaître leur importance. Or les transferts d'énergie dans le bâtiment ont pour origine la tendance naturelle à transiter des zones chaudes vers les zones froides, celle de l'air à se déplacer des zones de haute pression vers les zones de basse pression et celle de la vapeur d'eau à migrer des zones les plus humides vers les plus sèches [17]. Ainsi, l'apport de chaleur par transmission à travers une paroi opaque peut s'exprimer comme suit :

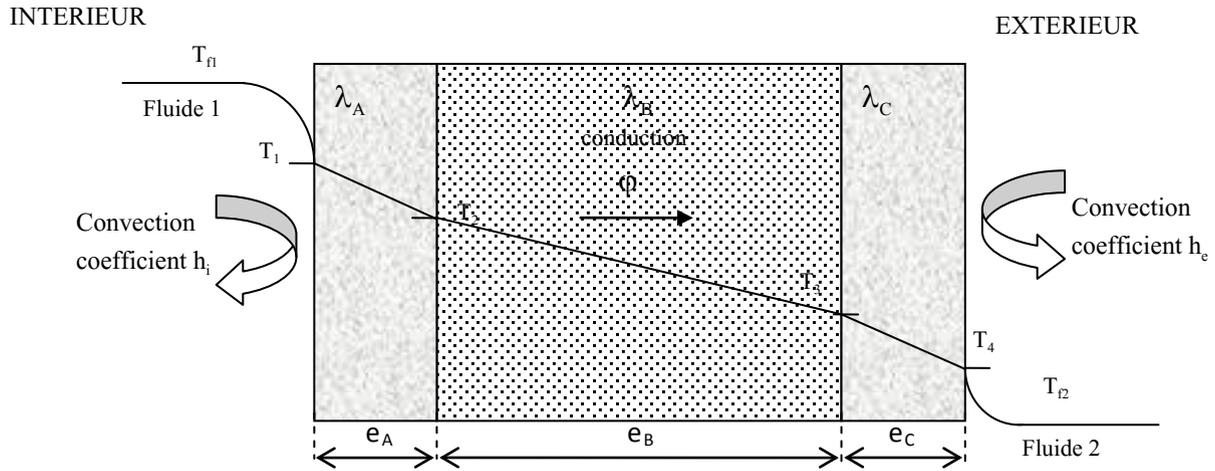
$$Q_T = U S \Delta T \quad (3.13)$$

Où :

U : Coefficient de transmission surfacique ( $W/m^2 K$ )

S : La surface de la paroi considérée ( $m^2$ )

$\Delta T$ : La différence de température entre les environnements extérieure et intérieure.



**Figure 3.7.** Illustration du phénomène de transfert de chaleur entre deux ambiances séparées par une paroi opaque (mur multicouches).

En général, chaque matériau est caractérisé par sa résistance thermique  $R$  qui mesure de l'aptitude d'un matériau à résister au passage de la chaleur. Ainsi, le coefficient de transmission thermique est l'inverse de la résistance thermique totale  $R_T$ .

$$U = \frac{1}{R_T} = \frac{1}{R_{si} + \sum_{i=1}^{i=n} R_i + R_{se}} \quad (3.14)$$

$R_{si} = \frac{1}{h_i}$  : La résistance thermique d'échange sur la surface intérieure ( $m^2 K / W$ )

$R_i = \frac{e_i}{\lambda_i}$  : La résistance thermique de chaque couche de la construction ( $m^2 K / W$ )

$R_{se} = \frac{1}{h_e}$  La résistance d'échange de chaleur à la surface extérieure ( $m^2 K / W$ )

Pour les conditions aux limites, les valeurs de la résistance thermique des échanges superficiels sont données dans le tableau 3.2.

Valeurs normalisées de $h_i$ , $h_e$ , $R_i$ et $R_e$	$h_i$ (W/m <sup>2</sup> K)	$R_{si}$ (m <sup>2</sup> K/W)	$h_e$ (W/m <sup>2</sup> K)	$R_{se}$ (m <sup>2</sup> K/W)	$R_{si} + R_{se}$
Paroi verticale (inclinaison $\geq 60^\circ$ ) Flux de chaleur horizontal	8	0.13	23	0.04	0.17
Paroi horizontale (inclinaison $\leq 60^\circ$ ) Flux de chaleur vers le haut	10	0.10	23	0.04	0.14
Paroi horizontale (inclinaison $\leq 60^\circ$ ) Flux de chaleur vers le bas	6	0.17	23	0.04	0.21

**Tableau 3.2.** Valeurs de la résistance thermique d'échanges superficiels.

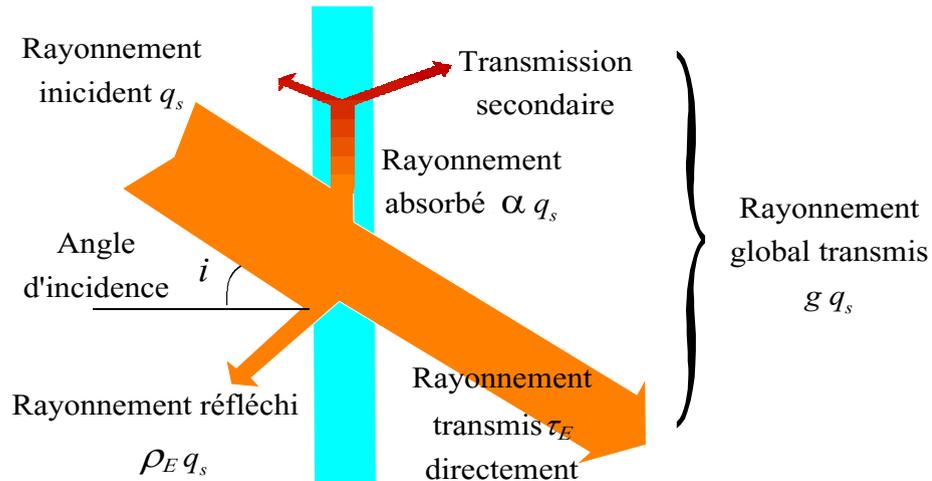
### 3.2.4. Transfert de chaleur à travers les baies vitrées

Les surfaces vitrées, qu'on appelle aussi baies vitrées, dans les bâtiments ont la possibilité de transmettre le rayonnement solaire, ce dernier peut être divisé en trois parties [18] (figure 3.8) :

- Une partie est réfléchié immédiatement par le vitrage.
- Une deuxième partie est directement transmise vers l'intérieur à travers le vitrage. Ces deux proportions d'énergie, à savoir le pouvoir de réflexion et de transmittance, dépendent de l'angle d'incidence du rayonnement solaire. Ainsi, la transmittance décroît lorsque cet angle est supérieur à  $45^\circ$  tandis que la réflexion s'accroît lorsque l'angle est supérieur à  $60^\circ$  et inversement.
- Une troisième partie est absorbée par le matériau qui s'échauffe et par conséquent, elle est transmise à travers le vitrage à l'intérieur par conduction puis vers l'intérieur du local par convection et rayonnement et/ou à l'extérieur par convection et par rayonnement de grande longueur d'onde.

La quantité d'énergie constituée de la partie transmise et de celle émise vers l'intérieur après absorption, par rayonnement et convection, par les surfaces vitrées constitue ce qu'on appelle les gains solaires du local considéré. Ils peuvent apporter une part importante des besoins en chauffage dans les bâtiments. En climat tempéré, ils avoisinent 10% des besoins d'un bâtiment ordinaire, mais ils peuvent atteindre 50 % dans les bâtiments bien conçus [16].

Le coefficient de transmission énergétique  $g$  est le rapport de la densité de flux thermique traversant un élément de construction transparente (y compris la transmission secondaire de chaleur) au rayonnement incident global. Les facteurs de réflexion  $\rho$ , de transmission  $\tau$ , d'absorption  $\alpha$  et solaire  $g$  dépendent de l'angle d'incidence  $i$ . Les valeurs standard sont calculées pour une incidence normale ( $i = 0$ ) [19].



**Figure 3.8.** Répartition du rayonnement solaire incident sur un vitrage.

Le coefficient de transmission énergétique  $g$  utilisé pour le calcul des gains solaires est en principe la moyenne dans le temps du rapport de l'énergie traversant l'élément exposé à l'énergie incidente sur celui-ci, en l'absence d'ombrage. Ce coefficient est légèrement inférieur à la valeur sous incidence normale et un facteur de correction doit être utilisé. En l'absence de donnée plus précise, on prendra un facteur de correction de 0.85 pour un simple vitrage, et 0.75 pour un double vitrage clair [16].

Le facteur d'ombre,  $F_s$ , qui se situe entre 0 et 1, représente toute réduction du rayonnement solaire incident due à un ombrage permanent de la surface considérée.

### 3.4. Besoins calorifiques d'un bâtiment

La méthode de calcul élabore pas à pas le bilan énergétique du bâtiment pour un usage standardisé. Le principe est de calculer les besoins en énergie de celui-ci ainsi que les consommations d'énergie pour les satisfaire. Pour qu'un bâtiment devienne économe en énergie pour le chauffage, il faut limiter les pertes de chaleur et valoriser les apports solaires tout en évitant la surchauffe en été. Lorsque la température intérieure est plus élevée que celle de l'extérieur, toute la chaleur contenue dans le bâtiment se propage plus ou moins rapidement vers l'extérieur. Les déperditions thermiques prises en compte dans la procédure de calcul sont de trois types : pertes par transmission de chaleur au travers des parois, pertes générées par la ventilation des locaux et pertes dues aux in/exfiltrations d'air [20].

Afin de maintenir la température de confort, il est nécessaire de compenser ces pertes par des apports équivalents : apports solaires et internes, chaleur captée par les éventuels panneaux solaires thermiques et chaleur apportée par le système de chauffage. Le bilan énergétique est l'ensemble des apports et déperditions pour un local ou bâtiment donné. Il sera alors indispensable de repérer les zones de déperdition de la chaleur pour envisager une meilleure isolation. L'analyse comprend également la production d'eau chaude sanitaire (ECS), l'éclairage, les équipements électriques ainsi que la consommation domestique de manière générale. La figure 3.9 schématise le bilan énergétique dans son ensemble pour un bâtiment ou zone donnée.

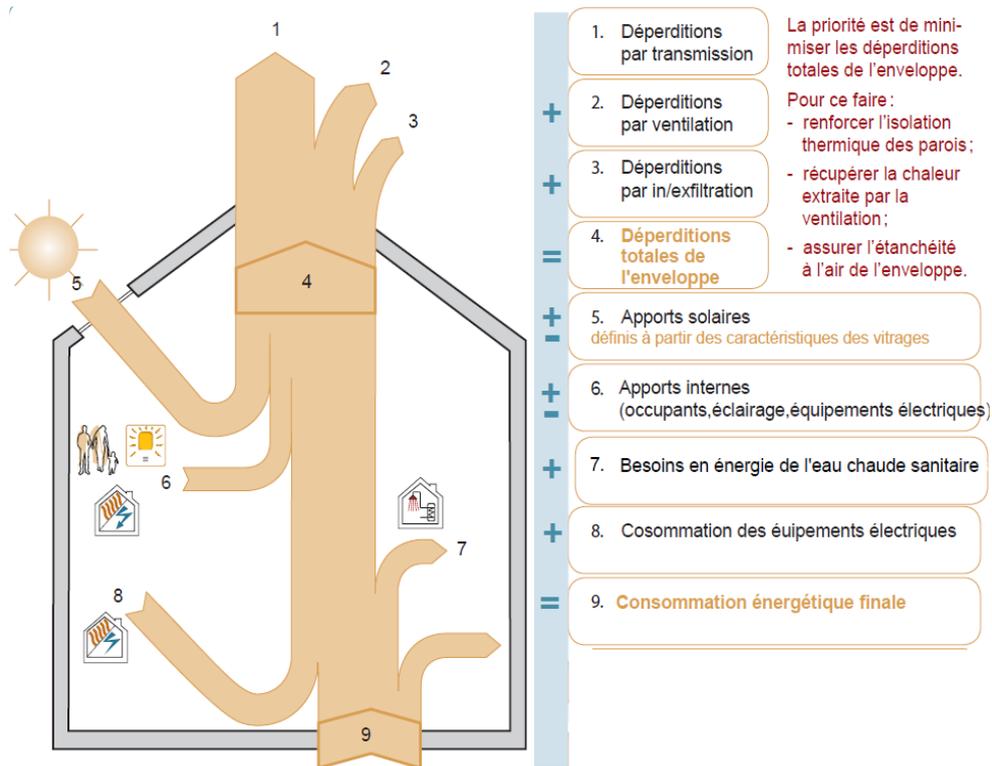


Figure 3.9. Bilan énergétique pour un local ou bâtiment donné.

### 3.4.1. Méthode des degrés jours

Différentes méthodes simplifiées ont été développées pour évaluer la demande de chauffage et de climatisation comme la méthode du degré-jour [21-23]. Le concept s'appuie principalement sur la différence de température entre une température intérieure de base et la température extérieure, multipliée par la durée de la différence de température. La méthode des degrés jours de chauffage est une méthode qui nécessite un nombre de données relativement réduit pour l'estimation des besoins énergétiques d'un bâtiment, et permet aussi d'identifier l'impact de l'intégration des mesures d'efficacité énergétiques dans un bâtiment notamment au niveau de l'enveloppe (isolation des murs, des toitures, taux de vitrage...)[22].

L'hypothèse sous-jacente de la méthode des DJU est que, pour maintenir une température intérieure spécifique, il existe une température extérieure dite "température de base" de telle sorte que si la température de l'environnement

extérieur est supérieure à cette température de base, un refroidissement / climatisation de l'air sera nécessaire, tandis qu'au contraire, si la température de l'environnement extérieur est inférieure à la température de base, des besoins en chauffage seront nécessaires [24]. Pour un lieu donnée, ces DJU représentent la somme des différences de températures journalières par rapport à une température de base imposée toute au long de l'année. Ce concept est également connu sous "DJU-base18" car la température de base est de 18 °C. On distingue deux valeurs de DJU permettant le calcul des besoins en chauffage et en climatisation [24] :

$$DJC = \sum_{i=1}^{PC} (T_{base} - T_o(i))^+ \quad (3.15)$$

$$DJR = \sum_{i=1}^{PR} (T_o(i) - T_{base})^+ \quad (3.16)$$

DJU est la valeur du degré-jour de chauffe

DJR est la valeur du degré-jour de réfrigération

$T_{base}$  est la température de base de l'environnement à chauffer

$T_o(i)$  est la température extérieure moyenne au jour  $i$

PC représente la période de chauffe allant généralement de Octobre à Mai [25, 26]

PR représente la période de refroidissement, et  $(.)^+$  indique que seules les valeurs positives sont considérées.

### 3.4.2. Besoins en chauffage par la méthode des degrés jours

La méthode s'appuie sur les degrés-jours obtenus, pour un site donné, en calculant - heure par heure - l'écart entre une température intérieure conventionnelle et la température extérieure constatée sur le site. La valeur moyenne sur une journée constitue le nombre de degrés-jours de cette journée. La sommation de ces valeurs sur toute la période hivernale constitue les degrés-jours du site.

Cette méthode utilise la température d'équilibre, définie comme étant la température moyenne extérieure en fonction de laquelle le besoin du bâtiment en matière de chauffage est calculé. En d'autres termes, la chaleur dégagée des sources internes comme l'éclairage, les équipements ménagers, les occupants et les radiations solaires comblent entièrement les besoins en chauffage du bâtiment jusqu'à la température d'équilibre. Une fois la température d'équilibre identifiée, Les besoins en chauffage et en refroidissement dus à l'enveloppe peuvent être calculés comme suit [27] :

$$Q_{\text{Envelop}} = 24 DP_{\text{envelop}} Dj \quad (3.17)$$

Dj : Nombre de degrés-jours dans la saison de chauffage et/ou de refroidissement.

### 3.5. Le confort thermique

Les études concernant les économies d'énergies dans l'habitat conduisent indubitablement à se préoccuper du confort thermique de l'être humain. Pourtant, il semble que pour beaucoup de concepteurs, la qualité radiative des ambiances soit ignorée et qu'une valeur de 19 °C pour la température d'air soit la seule préoccupation de leurs programmes. Des recherches sur les ambiances radiatives et des expériences s'y rapportant ont pourtant été faites afin de montrer que le confort pouvait être obtenu diversement et éventuellement plus économiquement qu'en se limitant à imposer une valeur pour la température d'air [28].

La définition du confort thermique dans les bâtiments est importante non seulement pour la qualité des ambiances intérieures, mais aussi pour la quantité d'énergie à fournir par les équipements d'ambiance [29]. Or le chauffage et le refroidissement de l'espace pour maintenir le confort thermique représente jusqu'à 60 à 70% de la consommation totale d'énergie dans les bâtiments non industriels [30], ce qui fait que l'énergie utilisée pour chauffer, ventiler ou climatiser les bâtiments représente la majorité de l'énergie consommée par ce secteur. La notion

de confort thermique est désignée comme une condition satisfaisante vis-à-vis de l'environnement thermique de l'ambiance. L'état du confort / neutralité thermique apparaît lorsqu'il y a un équilibre thermique entre le corps humain et son ambiance et qu'aucun mécanisme de lutte contre le froid ou le chaud n'est mobilisé [31]. Le bilan thermique de l'organisme dépend de multiples paramètres aussi variés que l'activité, le métabolisme, l'habillement ou encore la vitesse d'air. Bien entendu, les conditions thermoaérauliques et hydriques de son environnement rentrent en compte dans les mécanismes de transfert de chaleur : température d'air sec, température radiative moyenne, vitesse d'air et hygrométrie. Par ailleurs, des aspects psychologiques et sociologiques rentrent en jeu dans le ressenti subjectif du confort thermique.

La diffusion de chaleur entre l'individu et l'ambiance thermique y faisant partie s'effectue selon divers mécanismes (figure 3.10) [32]. Plus de 50 % des pertes de chaleur du corps humain se font par convection avec l'air ambiant (convection et évaporation par la respiration ou à la surface de la peau). Les échanges par rayonnement à la surface de la peau représentent jusqu'à 35 % du bilan alors que les pertes par contact (conduction) sont négligeables (< 1 %). Le corps perd également 6 % de sa chaleur à réchauffer la nourriture ingérée.

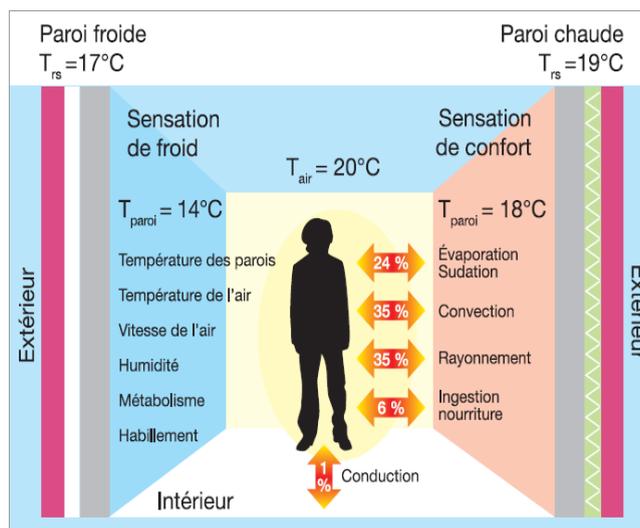


Figure 3.10. Echanges de la chaleur entre le corps humain et son environnement.

### 3.5.1. Les indicateurs du confort thermique

Le confort thermique est une sensation résultant de l'équilibre ou du déséquilibre des échanges de chaleurs entre le corps humain et son environnement. On peut ainsi distinguer deux types de facteurs influant sur le confort thermique: variables personnelles (telles que l'activité et l'habillement) et variables environnementales (telles que la température de l'air, la température radiante moyenne, la vitesse d'air et l'humidité relative de l'air). Ce deuxième groupe dépend directement de la conception du bâtiment ainsi que des systèmes de chauffage et de refroidissement [33].

#### La température de l'air

La température de l'air ( $^{\circ}\text{C}$ ) est simplement la température du fluide qui circule autour d'un individu et qui détermine le flux de chaleur entre l'air et l'individu. En réalité, la température de l'air n'est pas uniforme autour de l'individu, elle est différente à proximité du corps. Par exemple, dans un environnement à  $20^{\circ}\text{C}$ , la température de l'air sera plus élevée à proximité de la peau de l'homme nu en la comparant à une température de l'air à proximité du vêtement chez ce même homme vêtu. Mais à l'inverse, la température de l'air entre la peau et le vêtement sera supérieure à celle de l'air extérieur [34]. La température intérieure de consigne est égale à  $20^{\circ}\text{C}$  pour le chauffage et  $26^{\circ}\text{C}$  pour la climatisation [35]. Ces températures peuvent être modulées en fonction de l'affectation du local et de l'heure de la journée.

Selon le local		Selon le moment de la journée "Exemple chambre"	
Chambre (en moyenne)	$19^{\circ}\text{C}$	Harms	$16^{\circ}\text{C}$ (le sommeil est meilleur)
Salle de bains	$21$ à $22^{\circ}\text{C}$	Réveil	$20$ à $21^{\circ}\text{C}$
Circulation	$16^{\circ}\text{C}$	Jour	$16^{\circ}\text{C}$ (inoccupation)
Salle à manger	$18^{\circ}\text{C}$	Coucher	$20^{\circ}\text{C}$

**Tableau 3.3.** Températures en fonction de l'affectation du local et de l'heure de la journée [36].

### La température radiative moyenne

La température moyenne radiante est la température liée au ressenti des surfaces environnantes: murs plafonds, sols et fenêtres. La pondération des températures de surface se fait en fonction des facteurs de forme entre l'endroit où est situé l'occupant et les surfaces considérées constituant une enceinte fermée. Elle détermine la perte de chaleur du corps par rayonnement vers les surfaces voisines, et d'importantes répercussions sur le confort humain. En saison de chauffe, pour maintenir les conditions de confort thermique pour des individus qui ont des activités sédentaires, la différence de température entre la surface interne d'une fenêtre et celle des murs verticaux froids doit être maintenue inférieure à 10 °C et la vitesse de l'air doit rester inférieure à 0.15 m/s [34].

### La température opérative

La température des parois influence les échanges thermiques par rayonnement. La répartition des températures sur une paroi est très complexe. Cependant on admet que la température des parois est égale à la moyenne des températures des parois avoisinantes pondérée par leurs surfaces respectives. Cette température, qui reflète le confort ressenti, est couramment appelée "température opérative" ou "température résultante sèche" ( $T_r$ ) ou encore "température globale" notée souvent  $T_g$ . Elle est définie comme étant la moyenne pondérée de la température de l'air et de la température moyenne radiante [37]:

$$T_r = \frac{h_r T_{rm} + h_c T_a}{h_r + h_c} \quad (3.18)$$

$T_a$  : La température d'air, °C

$T_{rm}$  : La température radiante moyenne, °C

$h_c$  : Le coefficient des échanges convectifs,  $W/m^2 \text{ } ^\circ C$

$h_r$  : Le coefficient des échanges radiatifs,  $W/m^2 \text{ } ^\circ C$

Les poids relatifs des coefficients d'échange radiatifs et convectifs dépendent principalement de la vitesse d'air. On peut adopter le calcul approché suivant en tenant compte de la vitesse d'air  $v$  :

$$T_r = i.T_a + (1 - i)T_{rm} \quad (3.19)$$

Où  $i$  est défini en fonction de  $v$  (en m/s)

$v$	< 0.2	0.2 à 0.6	0.6 à 1.0
$i$	0.5	0.6	0.7

**Tableau 3.4.** Définition de  $i$  en fonction de la vitesse d'air.

A l'intérieur d'un bâtiment, les vitesses d'air sont faibles (ne dépasse pas 0.2 m/s). La température opérative peut être simplifiée :

$$T_{op} = \frac{T_{rm} + T_a}{2} \quad (3.20)$$

### Vitesse de l'air

Le coefficient d'échange convectif entre le corps et l'air ambiant dépend directement de la vitesse d'air, qui est classé parmi les facteurs d'environnement. C'est pourquoi un courant d'air entraîne une sensation de froid : l'accroissement de la vitesse d'air augmente l'échange convectif et donc la perte de chaleur. Pour cette raison, afin de maintenir le confort thermique en hiver, la vitesse de l'air doit être maintenue au niveau le plus bas possible. Les flux d'airs possèdent deux origines. D'une part, la circulation d'air naturelle ou forcée prévue par le système de ventilation, d'autre part, les gradients de température importants dans une pièce qui provoque des déplacements d'air. Cependant, en été, la circulation d'air permet un rafraîchissement et par la même occasion une plus grande tolérance aux variations de température dans l'appréciation du confort thermique [38].

### Humidité relative de l'air

A des températures moyennes (15-25 °C environ), dans des conditions stationnaires (c'est à dire si une personne reste dans le même espace pendant

longtemps), l'humidité relative de l'air a une influence faible sur la sensation de chaleur : une augmentation de l'ordre de 10% de l'humidité relative aura la même incidence qu'une augmentation 0.3 °C de la température de l'air. Pourtant, dans des conditions transitoires (c'est à dire si une personne se déplace de l'intérieur à l'extérieur ou d'un espace à l'autre ayant une humidité différente) l'incidence thermique du changement en termes d'humidité pourrait être 2 ou 3 fois plus grande. Quand la température dépasse les 30 °C, l'influence des changements de l'humidité relative peut avoir des incidences considérables sur le confort thermique. De hauts niveaux d'humidité provoquent, par exemple, des problèmes d'électricité statique, le développement de micro-organismes et de moisissure. Le maintien de l'humidité relative entre 30% et 60% va limiter les problèmes de ce genre [39].

### **3.5.2. Evaluation du confort thermique**

#### **3.5.2.1. L'approche analytique (statique)**

Le modèle statique le plus répandu est le modèle développé en 1970 par Fanger. Il traite le confort thermique à travers le calcul du bilan thermique du corps humain. De nombreuses recherches publiées jusqu'à ce jour, permettent d'opérer une sélection des principaux paramètres à prendre en compte. Par la suite, les travaux de Fanger sur les ambiances thermiques ont abouti à la mise en place de la norme ISO 7730 "Ergonomie des ambiances thermiques", qui propose les indices PMV et PDD comme moyen d'évaluer l'environnement thermique pour diverses combinaisons de l'habillement et de l'activité, avec quatre variables d'ambiance (température d'air, température radiante, vitesse de l'air et humidité relative).

Le premier indice (PMV) défini par la relation 3.21, prévoit le vote moyen de sensation thermique (globale) d'un groupe de personnes sur l'échelle de sensation thermique de l'ASHRAE<sup>2</sup>.

---

<sup>2</sup> ASHRAE :American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers

$$PMV = (0,303 \cdot \exp(-0,036 \times M) + 0,028) \times S \quad (3.21)$$

Avec,  $M$  est le taux métabolique, ou la chaleur du corps humain, est souvent mesurée dans l'unité "Met". Le taux métabolique d'une personne assise et détendue vaut 1 Met, ou  $1 \text{ Met} = 58 \text{ W m}^{-2}$ .  $S$  est la charge thermique de l'occupant. Elle est définie comme la différence entre la production de chaleur interne et la perte de chaleur vers l'environnement réel.  $S$  prend en compte les températures d'air et des parois, la vitesse et l'humidité de l'air ainsi que le type d'activité et vestimentaire des occupants.

Pour déterminer l'acceptabilité de l'ambiance thermique, le deuxième indice (PPD) prévoit le pourcentage des personnes qui seront insatisfaites dans l'ambiance considérée.

$$PDD = 100 - 95 \cdot \exp[-(0,03353 \cdot PMV^4 + 0,2179 \cdot PMV^2)] \quad (3.22)$$

La limite de PDD recommandé pour l'environnement thermique idéal est de 10%, c'est-à-dire que le PMV se situe entre -0.5 et +0.5. Ainsi, de faibles valeurs pour les deux indices garantissent une bonne qualité de l'air intérieur et le confort thermique.

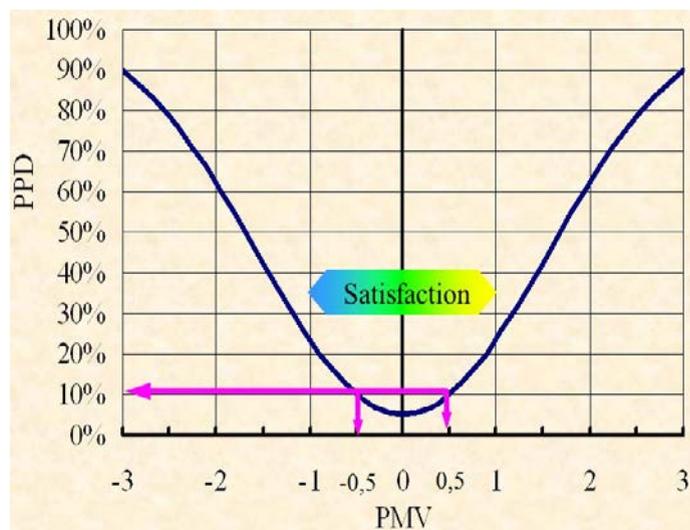


Figure 3.11. Zone de confort en valeur de PMV et PDD.

Le PMV permet de calculer le vote moyen de sensation thermique d'un groupe important de personnes (plus de 1000) en se référant à une échelle subjective

comportant 7 points de "très chaud" à "très froid" (tableau 3.5). Cette échelle est en relation directe avec l'équation du confort relativement complexe définie par Fanger. L'avantage de cet indice réside dans le fait qu'il permet d'obtenir un paramètre unique de confort (ou plus précisément de sensation thermique) tenant compte de tous les paramètres principaux influençant le confort (physiques et physiologiques).

Sensation thermique	Très chaud	Chaud	Légèrement chaud	Neutre	Légèrement froid	Froid	Très froid
PMV	3	2	1	0	-1	-2	-3

**Tableau 3.5.** Echelle d'indices de confornts (ASHRAE).

Bien que l'approche analytique permette d'assurer les conditions de confort thermique dans les bâtiments, cela ne suffira pas pour répondre aux exigences du développement durable. La consommation énergétique doit être considérée au même titre que le confort. Or, avec des méthodes statiques telle que le PMV, la climatisation active risque d'être généralisée dans les bâtiments pour garantir le confort au détriment de la consommation énergétique. Ceci a été vérifié par les résultats des investigations dans les bâtiments non climatisés où les conditions de confort thermique trouvées étaient plus amples que celles recommandées par le PMV [29]. Les chercheurs se sont vite rendus compte des lacunes de l'approche analytique en multipliant leurs investigations dans les bâtiments. En développant l'approche adaptative, ils ont proposés un alternatif aux méthodes reprises par les normes, afin de prendre en compte la capacité d'adaptation des occupants.

### 3.5.2.2 Approche adaptative

La théorie du confort adaptatif se différencie de celle de Fanger en intégrant dans sa réflexion l'adaptation de l'occupant dans son environnement. Cette approche est basée sur des sondages de terrain, et utilise les résultats des études expérimentales in situ pour définir les conditions de confort en fonction des

données météorologiques extérieures. Le confort adaptatif suscite actuellement beaucoup d'intérêts, des réflexions ont été menées afin de l'inclure dans les normes actuelles qui ne sont, pour l'instant, que basées sur les méthodes de l'approche analytique.

La méthode adaptative développée (Standard ASHRAE55, 2004) [40] permet de calculer la température de confort  $T_C$  dans les bâtiments soumis à une ventilation naturelle en fonction de la moyenne mensuelle de la température extérieure  $T_0$ .

$$T_C = 0.31 T_0 + 17.8 \quad (3.23)$$

$T_C$  : La température de confort ;

$T_0$  : La moyenne mensuelle de la température extérieure.

Cette température de confort est la température opérative dans le bâtiment qui prend en compte le rayonnement des parois ainsi que la vitesse de l'air. Le standard ASHRAE55 (2004) définit une bande de +/- 2.5°C de largeur autour la température de confort pour 90% d'acceptabilité, et de +/- 3.5°C de largeur pour 80% d'acceptabilité.

### 3.5.2.3. Digrammes de confort

Différents diagrammes bioclimatiques sont utilisés comme outils pour déterminer les niveaux de confort. Le plus largement utilisé inclut le diagramme développé par Victor Olgyay [41,42] pour déterminer le confort extérieur ainsi que des diagrammes pour le confort intérieur, y compris l'indice de confort thermique (ou température effective), qui peut être calculé en utilisant les valeurs d'humidité relative et de température intérieure [43]. Ce diagramme "Olgyay" ne donne pas de solutions globales pour la conception des bâtiments. Mais seulement des corrections lorsque les conditions sont en dehors de la zone de confort ou des actions telles que l'humidification, la ventilation ou changement de la température

radiante, en supposant que tout est donné à l'extérieur, où la température intérieure peut être similaire à l'extérieur.

Cherchant à intégrer l'influence de l'enveloppe du bâtiment, Givoni [44] crée un nouveau diagramme bioclimatique de bâtiments. Il exprime, sur un diagramme psychrométrique (diagramme d'air humide), les moyens d'intervention par des dispositifs architecturaux et techniques passives. Ces moyens peuvent être utilisés pour remédier aux sollicitations du climat (défini par le couple température / humidité relative) lorsque le point représentatif de celui-ci sort à certains moments de la zone de confort en air calme. Ce diagramme, donné par la figure 3.12, est divisé en différentes zones pour lesquelles le confort thermique peut être optimisé de manière passive à l'intérieur d'un bâtiment en faisant appel à l'une des stratégies de la conception suivante [45]:

- **La ventilation naturelle** : elle se base sur l'infiltration de l'air extérieur à travers les fenêtres et les ouvertures pour créer des courants d'air rafraichissant la peau par convection et aider à s'évaporer la sueur.
- **La masse thermique** : basée sur la propriété des murs épais, absorbe la chaleur de l'air progressivement, sans leur évolution rapide et marquée de la température. Cette stratégie peut réduire les valeurs maximales de la température radiantes moyennes et la température de l'air intérieur en été ou pour augmenter les valeurs minimales dans la nuit en hiver.
- **La ventilation nocturne** : se réfère aux cas où un bâtiment avec une masse thermique très forte est exposé ventilé largement la nuit afin de refroidir la masse par convection.
- **L'évaporation directe** : quand un flux d'air passe à travers un réservoir d'eau ou à travers un matériau poreux, ou lorsque l'eau projetée par pulvérisation par voie humide, l'évaporation refroidit, l'air se produit, soit de l'humidité accrue de ce fait.

- **Chauffage solaire passif** : la pratique la plus courante dite "captage solaire directe" par les parois transparentes composées de vitres exposées au soleil. Le passage des rayons solaires par du verre crée un effet de serre. La température intérieure augmente et traverse les planchers et les murs intérieurs lourds afin qu'ils accumulent la chaleur en quantités importantes. Ainsi, la température se dissipe peu à peu et se retarde. En outre, une isolation thermique couvre le reste des surfaces intérieures afin de préserver la chaleur mieux prise. Cette stratégie de chauffage passif est en fonction de la quantité de rayonnement solaire disponible tous les jours sur les façades (en fonction de leur orientation, la latitude et les conditions atmosphériques).

Par la figure 3.12, on peut présenter synthétiquement la signification des zones de diagramme de Givoni. Ce diagramme nous ont permis de citer les solutions qui peuvent être envisagées pour créer une ambiance adaptée aux caractéristiques climatiques locales dédiées aux locaux. Ces stratégies seront appliquées pour aider à réduire l'utilisation des dispositifs consommateurs d'énergie.

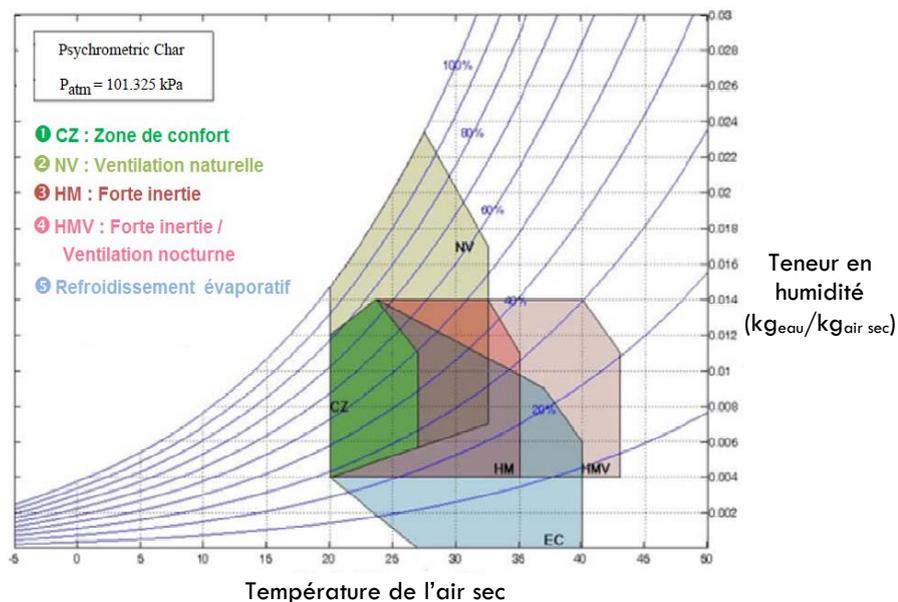


Figure 3.12. Diagramme psychrométrique adapté par Givoni [46].

### **CZ : Zone de confort**

La zone de confort, appelée zone CZ, présente les conditions idéales pour le corps humain. Statistiquement, cette zone est confortable pour 70% de la population [47]. Elle représente la zone dans laquelle le corps humain, avec des vêtements légers et peu d'activité, ne nécessite pas les dépenses énergétiques pour rester à l'aise. Cette zone est liée par des valeurs de température entre 20 et 27 °C et des valeurs d'humidité relative entre 20% et 80%. Aucune stratégie de contrôle ne doit être mises en œuvre dans cette zone.

### **NV : Ventilation naturelle**

Zone expliquée par l'effet bénéfique de la vitesse de l'air sur l'évaporation cutanée, les échanges par convection et le retardement de l'apparition de condensations. Cette zone n'implique les caractéristiques du bâtiment qu'en ce qui concerne son aptitude à être ventilée, encore qu'une vitesse d'air puisse être obtenue grâce à des ventilateurs sans renouvellement d'air. C'est en quelque sorte la zone de confort étendue vers des températures et des humidités plus fortes où la sensation de confort subsiste du fait du plus grand rafraîchissement dû à la vitesse de l'air. La ventilation accélère en effet la perte de chaleur de l'organisme quand l'air n'est pas plus chaud que la température de la peau et qu'il n'est pas saturé de vapeur d'eau. Cette stratégie peut être réalisée naturellement en utilisant une ventilation transversale des façades nord-sud ou des vents dominants, l'effet de cheminée.

### **HM : Forte inertie**

Cette zone correspond à la zone HM, et elle se limite par une température maximale 35 °C. Givoni [48] affirme que la température maximale pour laquelle la stratégie du stockage par l'inertie est encore possible dépend d'une part de la pression de vapeur ambiante et d'autre part de la vitesse de l'air à l'intérieur du bâtiment. Cette stratégie notamment, en hiver peut réduire considérablement les

besoins énergétiques par une bonne exposition du bâtiment au rayonnement solaire, en particulier les planchers qui sont les parties les plus exposées et le plus souvent dotées d'une plus forte inertie par rapport au reste des parois. Egalement, les partitions intérieures contribuent à augmenter la capacité de stockage du bâtiment par leur contact des deux côtés avec l'air intérieur. C'est pourquoi certaines stratégies de conception favorisent l'inertie des dalles et des cloisons internes en laissant les parois extérieures plutôt légères mais isolantes avec de grandes surfaces vitrées afin de favoriser l'exposition au rayonnement solaire [49]. La favorisation des apports solaires est optimisée lorsque l'orientation du bâtiment est au sud, alors Il est idéal de placer un dispositif mobile de protection pendant la journée pour éviter les gains et favoriser la dissipation nocturne. Cette stratégie est très recommandée dans le climat méditerranéen.

#### **HMV : Forte inertie et Ventilation nocturne**

Cette zone correspond à la zone HMV, et elle se limite par une température maximale 43 °C. Le rôle de l'inertie thermique est souvent associé aux périodes nocturnes par sa propriété à stocker les apports excédentaires durant la journée et de les restituer plus tard lorsqu'il fait plus froid la nuit en ayant recours à la ventilation. Durant les nuits d'été, lorsque la température extérieure est généralement inférieure à la température à l'intérieur du bâtiment, il est possible d'appliquer une ventilation naturelle. L'air ventilé favorise par la convection la dissipation de la chaleur stockée dans les parois en l'évacuant vers l'extérieur. En outre, l'usage de brasseurs d'air permet d'accentuer le mouvement de l'air intérieur et d'intensifier les échanges convectifs [50]. Cette stratégie permet ainsi de réduire considérablement les pics de chaleur dans le bâtiment, mais pour qu'elle donne de bons résultats l'enveloppe du bâtiment devrait comprendre des matériaux capacitifs qui transmettent de l'énergie avec la plus grande différence de phase possible (environ 12 h) [51] avec un certain amortissement. La toiture des bâtiments concernés doit être particulièrement soignée. Elle peut être légère

et isolée plutôt que lourde et protégée du rayonnement solaire. Quant à la masse thermique intérieure, il faut rechercher avant tout une grande surface d'échange plutôt que de fortes épaisseurs des cloisons intérieures.

### **Refroidissement évaporatif**

Zone, qui ne concerne que l'état hygrométrique de l'air. Ce dernier ne peut pas être refroidi, en fournissant de sa chaleur sensible pour évaporer de l'eau, que dans la mesure où il est sec, et qu'il peut absorber suffisamment de chaleur d'eau. Cette stratégie est très recommandée dans les climats secs et arides. Il vise à obtenir un confort en réduisant la température par évaporation de l'eau tout en augmentant l'humidité relative. L'humidification peut être obtenue à l'aide de la végétation extérieure, de l'eau (étangs ou fontaines, etc.)

### **3.5.3. Confort hygrothermique des habitants**

Le confort ne dépend pas seulement du paramètre température mais aussi de l'hygrométrie de l'air ambiant. Les résultats ont montré que la température et l'humidité ont un impact significatif sur le ressenti immédiat et adaptative du degré de confort intérieur [52]. Or, la baisse de la température et le taux d'humidité au niveau de l'air intérieur peut améliorer le confort thermique. En effet, la satisfaction des occupants par rapport au confort thermique augmente linéairement avec la diminution de l'enthalpie de l'air. Les fréquentes mesures adoptées afin de baisser la facture énergétique d'un bâtiment se résument dans une forte isolation avec une réduction des infiltrations et du renouvellement d'air intérieur. Cependant ces solutions peuvent accentuer la probabilité d'apparition des pathologies occasionnées par une présence excessive de l'humidité, soit au niveau de l'ambiance habitable, soit au niveau de l'enveloppe du bâtiment [1]. Ces pathologies liées à l'humidité dans le bâtiment sont dues, soit à l'action direct de l'humidité comme la condensation à la surface des parois ou la dégradation des propriétés thermiques des isolants, soit à une action indirecte où les conditions

hygrométriques représentent un milieu favorable d'apparition de pathologies comme le développement fongique. L'analyse hygrothermique est basée sur la notion du confort hygrothermique par la combinaison des données mensuelles moyennes minimum et maximum de température et d'humidité sur un diagramme d'air humide doté d'une zone de confort humain définie en fonction de degrés d'activité et d'habillement. L'interprétation architecturale et constructive de cette analyse est faite par un outil appelé diagramme bioclimatique de bâtiments. Cet outil a pour finalité le diagnostic climatique par rapport à la composante confort hygrothermique humain.

#### **3.6. Diagnostic géo-climatique**

Notre climat en Algérie n'offre pas des conditions climatiques suffisantes pour assurer le confort thermique au bâtiment toute l'année. Il est nécessaire de corriger les conditions climatiques extérieures par des solutions proprement architecturales et techniques passives pour améliorer le confort thermique à l'intérieur. Pour cette affaire et avant d'entamer la conception architecturale proprement dite d'un projet de bâtiment écologique il est nécessaire pour l'architecte de réaliser un diagnostic géo-climatique afin de situer les stratégies et les grandes lignes directrices des réponses architecturales et techniques passives appropriées pour chaque localité territoriale donnée. [45].

Le climat de l'Algérie, confère une variabilité particulière, allant de la plus aride à la plus humide (figure 3.13). La grande différence entre le Nord et le reste du pays étant due à la chaîne de dorsale algérienne qui sépare les zones soumises au climat méditerranéen de celles soumises au climat aride engendré par le Sahara. En outre, à l'intérieur de chaque zone, il existe des spécificités climatiques locales.

L'Algérie, influencée par la mer, la topographie et l'altitude, a un climat méditerranéen, subtropical et tempéré [54,55]. Cela se caractérise par une alternance régulière de deux saisons fortement contrastées:

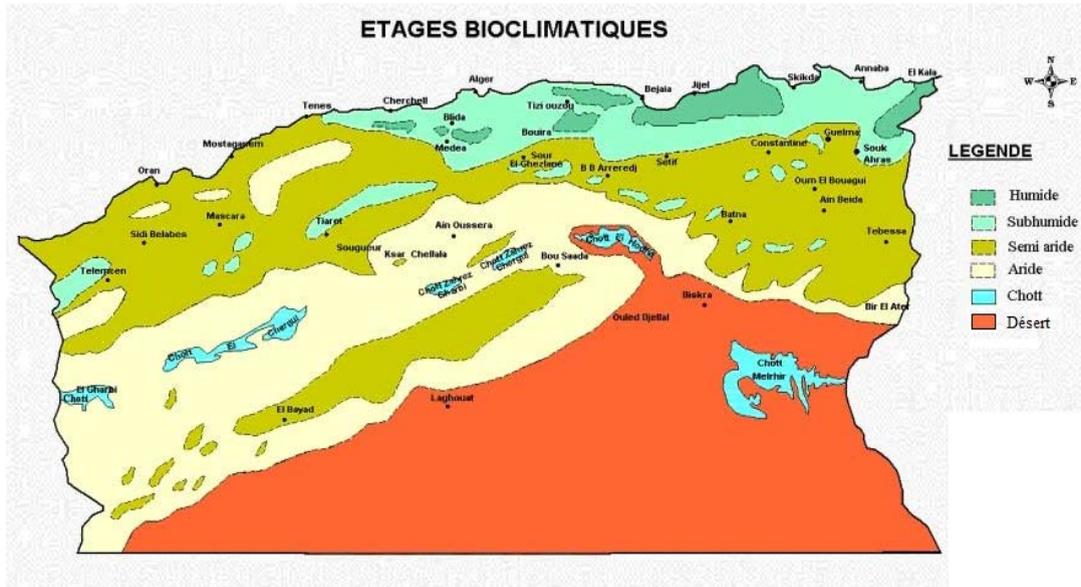


Figure 3.13. Les zones bioclimatiques de l'Algérie [53].

- Un été, chaud et sec et de durée très variable, de 3 à 4 mois sur la côte, qui s'étend sur 5 ou 6 mois sur les hautes plaines et sur 6 mois dans l'Atlas du Sahel.
- Un hiver qui se distingue par sa relative douceur et son humidité et qui constitue, dans le contexte méditerranéen, la véritable saison des pluies. Celles-ci frappent par leur extrême irrégularité.
- Quant aux intersaisons, automne et printemps, ce sont des périodes transitoires où peuvent se produire, simultanément, quelques situations typiques d'hiver ou d'été.

Toute conception architecturale en Algérie doit alors veiller à se concilier le climat durant les deux saisons. De plus, une maison avec une forte inertie peut être avantageuse, notamment en demi saison, par sa propriété à stocker les apports excédentaires durant la journée et de les restituer plus tard, évitant de rallumer le chauffage. Cependant, dans les constructions conventionnelles actuelles, les murs (généralement en briques ou en parpaings) sont placés à l'extérieur et l'isolation est placée du côté intérieur (cas de l'Algérie). Les isolants courants comme les polystyrènes et les laines minérales sont très légers, donc offrent très peu d'inertie et c'est pourquoi il est difficile de garder ces maisons fraîches l'été [56].

Dans les régions intérieures de l'Algérie qui ont un climat chaud et sec et qui sont loin des effets de la mer, l'humidification de l'air entrant permet d'augmenter le pourcentage d'humidité dans l'air. Ici l'action passe par l'intégration architecturale du végétal et de l'eau. Le rafraîchissement adiabatique est l'une des techniques qui consiste à diminuer la température de l'air ambiant en augmentant son humidité spécifique, à enthalpie constante. Différents moyens sont employés, le plus souvent, ils sont associés à des fontaines. Les jets d'eau sont utilisés pour absorber une partie de la chaleur des bâtiments. Cette énergie ainsi absorbée sert à l'évaporation des gouttelettes d'eau.

La ventilation nocturne représente aussi l'une des stratégies de conception architecturale sous notre climat, principalement en région saharienne du sud. Elle est nécessaire en période de forte température d'air extérieur le jour pour fournir un refroidissement additionnel (solution indiquée sur le diagramme de Givoni). En refroidissant la nuit la structure "effusive" de la construction par la ventilation nocturne, c'est le stockage de la fraîcheur nocturne qui améliore le confort thermique de jour le lendemain.

Ayant donné le climat saharien très chaud et très sec, le choix du site d'implantation doit obéir à une conception du plan d'urbanisme compact, capable à réduire la surface exposée au soleil et d'augmenter l'inertie thermique des constructions. Les circulations doivent être ombragées au maximum l'été et favoriser la ventilation naturelle. Les balcons, les portes à faux, les passages couverts ou les arcades ajoutent à créer des ombres portées sur les habitations [56].

Les bâtiments doivent autant que possible avoir une double orientation et les ouvertures prévues sur les façades permettent une ventilation transversale énergétique la nuit pendant l'été pour refroidir la structure du bâtiment. L'objectif finalement est de concevoir des bâtiments adoptés au climat avec un confort

optimal et une moindre consommation d'énergie dans une perspective d'atteindre une autonomie énergétique.

### 3.7. Conclusion

Après avoir quantifié les principales sources des déperditions thermiques et les relations établissant le bilan thermique d'un local on peut conclure que le bâtiment est conçu pour jouer un rôle de filtre thermique permettant de recréer un microclimat intérieur indépendant des fluctuations météorologiques extérieures. Les ambiances intérieures doivent alors répondre aux exigences de confort des occupants (problèmes de renouvellement d'air, forts gradients de température, courants d'air, etc.) tout en optimisant les coûts énergétiques et en réduisant les impacts environnementaux. La démarche de réduction des coûts énergétiques est souvent associée à une baisse des prestations, par exemple à une diminution de confort et qu'il est vrai qu'on peut diminuer la consommation d'énergie d'un bâtiment en supprimant ou en diminuant le chauffage, l'éclairage ou la ventilation.

La conception énergétique d'un bâtiment doit être étudiée en amont. Il s'agit ici de comprendre le comportement thermo-aéraulique d'un bâtiment en vue de prédire sa réponse face à différentes situations (chauffage, ventilation, ensoleillement...). Ainsi la conception architecturale a une influence primordiale sur la performance thermique des bâtiments et par conséquent, sur le confort thermique des usagers. Toute approche visant à prédire cette influence doit joindre quatre éléments : le contexte géo-climatique local, le niveau de confort, le comportement humain d'utilisateur et le bâtiment lui-même.

Les connaissances géo-climatologique sont essentielles pour réaliser une architecture environnementale efficace, intégrée et de qualité. Un architecte interprétant bien les variables climatologiques du site est en mesure de créer un bâtiment qui tire judicieusement profit du potentiel climatique local. Le diagnostic des données contextuelles géo-climatiques qu'on a mené à la fin de ce chapitre ainsi que le contexte environnemental et énergétique actuel en Algérie nous ont

obligé à repenser notre développement architectural constructif en le fondant sur de nouvelles valeurs architecturales écologiques. Parmi les nombreux objectifs de cette démarche, on cherche notamment à évaluer les besoins de chauffage et de refroidissement d'une construction réelle multizone énergivore à des régimes radiatifs différents afin d'optimiser la conception de son enveloppe. Ce sujet constituera l'un des objets du chapitre suivant.

## Références

1. M.Y. Ferroukhi, Modélisation des transferts thermo hydro aérauliques dans les enveloppes de bâtiments : évaluation des désordres causés par l'humidité, Thèse de Doctorat en génie civil, Université de La Rochelle, 2015, p29.
2. J. Desmons, Aide-mémoire de génie climatique, 3<sup>ème</sup> édition, Édition, Paris: Dunod, 2012.
3. C. Flory-celini, Modélisation et positionnement de solutions bioclimatiques dans le bâtiment résidentiel existant, Thèse de Doctorat en génie civil, Université Lyon 1 Claude Bernard, 2008.
4. Echanges thermiques d'une paroi (1/2), Techniques de construction, complément technique, Novembre/Décembre 2010, site web : [www.editionsdumoniteur.com](http://www.editionsdumoniteur.com)
5. D. Samri, Analyse physique et caractérisation hygrothermique des matériaux de construction: approche expérimentale et modélisation numérique, Thèse de Doctorat en Génie Civil, L'Institut National des Sciences Appliquées de Lyon, 2008.
6. M. Hamdani, Choix de l'orientation et des matériaux de construction en vue d'améliorer les performances thermiques des bâtiments, Thèse de Doctorat en Physique Énergétique, Université Abou beker Belkaid de Tlemcen, 2015.
7. A. Leibard, A.D. Herde, Traité d'architecture et d'urbanisme bioclimatique, concevoir, édifier et aménager avec le développement durable, 2006.
8. F. Dominguez-Munoz, B. Anderson, J.M. Cejudo-Lopez, A. Carrilo-Andrès, Uncertainty in the thermal conductivity of insulation materials, *Energy and Buildings*, 42 :2159-2168, 2010.
9. T. Gallauziaux, D. Fedullo, Le Grand livre de l'isolation, Ed. Eyrolles, 2009.
10. S.B. Sadineni, S. Madala, R.F. Boehm, 2011, Passive building energy savings: A review of building envelope components, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Octobre 2011. Vol. 15, n° 8, p. 3617-3631.
11. N. Aste, A. Angelotti, M. Buzzetti, The influence of the external walls thermal inertia on the energy performance of well insulated buildings, *Energy and Buildings*, Novembre 2009. Vol. 41, n° 11, p. 1181-1187.

12. A. Bornarel, S. Brindel, B. Brisedou, E. Bussolino, S. Cortesse, J. Fradin, Y. Mansouri, F. X. Monaco, M. Raoust, M. Serieis, Confort d'été passif, Ouvrage réalisé à la suite d'un groupe de travail de l'ICEB, en collaboration avec l'agence régionale de l'environnement et des nouvelles énergies ARENE Île-de-France, Avril 2014, ISBN EAN : 978-2-911-533-07-5
13. F. Mazria, E, The passive solar energy book, Rodale Press, Inc., Emmaus, PA, USA 1979.
14. R. Camous, D. Watson, L'habitat bioclimatique. L'Étincelle, 1983.
15. M.A.C. Haddam, Application de quelques notions de la conception bioclimatique pour l'amélioration de la température interne d'un habitat, Thèse de Doctorat en physique électronique et modélisation, Université de Tlemcen, 2015.
16. N. Morel, E. Gnansounou, Énergétique du Bâtiment, Section de Génie Civil, 4<sup>ème</sup>/5<sup>ème</sup> année, Faculté d'environnement naturel, architectural et construit, Lausanne, 2007.
17. G. Lefebvre, Comportement thermique dynamique des bâtiments : simulation et analyse, Techniques de l'Ingénieur, traité Génie énergétique, B 2 041, 1994.
18. Y.M. Moubark, Contribution à l'évaluation énergétique des bâtiments au nord du Maroc : Cas de la ville de Tanger, Thèse de Doctorat en Énergétique, Université Abdelmalek Essaâdi faculté des sciences et techniques Tanger, Septembre 2014.
19. NF EN 410, Verre dans la construction - Détermination des caractéristiques lumineuses et solaires des vitrages, <http://www.boutique.afnor.org/norme/nf-en-410/verre-dans-la-construction-determination-des-caracteristiques-lumineuses-et-solaires-des-vitrages/article/650547/fa167858>.
20. J. Guillemeau, P. Wagelmans, J. Wagelmans, M.C. Pirenne, guide Bâtiment résidentiel, Ouvrage conçu et réalisé par le Centre interdisciplinaire de formation de formateurs de l'Université de Liège (CIFIUL), 2010, méthode de calcul Chauffage 3.3.
21. O. Kaynakli, A review of the economical and optimum thermal insulation thickness for building applications, Renewable and Sustainable Energy Reviews, 16: 425–425, 2012.
22. R. Idchabani, M. Elganaoui, M. Garoum, Besoins énergétiques et impact environnemental du chauffage des bâtiments résidentiels au Maroc.
23. R. Kharchi, B. Benyoucef, Analyse des besoins énergétiques en chauffage et en rafraîchissement : Cas de trois sites d'Algérie, 15<sup>èmes</sup> journées internationales de thermique JITH2011, Septembre 2011.
24. L. Guan, Preparation of future weather data to study the impact of climate change on buildings, Building and Environment, 44:793–800, 2009.
25. Compétences professionnelles du technicien froid et climatisation, site web : <http://www.abcclim.net/degres-jour-dju.html>

26. C. Spitz, Analyse de la fiabilité des outils de simulation et des incertitudes de métrologie appliquée à l'efficacité énergétique des bâtiments, PhD thesis, Université de Grenoble, 2012.
27. NOR: ETL1234842A, Méthode 3CL-DPE v1.3, JORF n°0262 du 10 novembre 2012 page 17780 texte N° 9.
28. J.C. Deval, Le confort thermique en climat tempéré, Revue de Physique Appliquée, 1984, 19 (7), pp.513-531.
29. R. Cantin, B. Moujalled, G. Guarracino, Complexité du confort thermique dans les bâtiments, 6<sup>ème</sup> congrès Européen de Science des Systèmes Paris 19-22 septembre 2005.
30. A.M. Omer, Energy, environment and sustainable development, Renew Sustain Energy Rev 2008; 12 (9): 2265–300.
31. R. Lapisa, Etude du rafraichissement passif de bâtiments commerciaux ou industriels, Thèse de Doctorat de l'Université de La Rochelle, Spécialité: Énergétique et Thermique, 2015.
32. Batitherm, Société indépendante d'ingénieurs conseils spécialisée dans le domaine de la physique du bâtiment, des énergies renouvelables, des expertises techniques et énergétiques, site web : <http://www.batitherm.ch/confort-thermique.html> ,
33. M. Assimakopoulou, Développement et évaluation des systèmes et stratégies de contrôle de régulation d'un vitrage électrochimique pour des applications de bâtiment, Thèse de Doctorat de l'institut national des sciences appliquées de Lyon INSA, Spécialité: Génie civil, 2004.
34. P. Hollmuller, B. Lachal, F. Romerio, W. Weber, Habitat, confort et énergie, Actes de la 13<sup>ème</sup> Journée du CUEPE, Colloque du cycle de formation du CUEPE 2002-2003, Centre universitaire d'étude des problèmes de l'énergie, 2003.
35. ADEREE (Agence nationale pour le développement des énergies renouvelables et de l'efficacité énergétique), Les éléments techniques du projet de la réglementation thermique du bâtiment au Maroc 2011, site web : [www.aderee.com](http://www.aderee.com).
36. S.M.A. Bekkouche, Modélisation du comportement thermique de quelques dispositifs solaires, Thèse de Doctorat en Physique Electronique, Université de Tlemcen, Mai 2009.
37. Guide technique pour le chauffage, la ventilation et la climatisation, L'Agence nationale pour le développement des énergies renouvelables et l'efficacité énergétique "ADEREE", [https://www.aus.ma/images/aust/actualité/ADEREE/Guide % 20CVC.pdf](https://www.aus.ma/images/aust/actualité/ADEREE/Guide%20CVC.pdf).
38. Y. Raffenel, Optimisation du contrôle thermique dans une Habitation multi sources, Thèse de Doctorat présentée à L'école Centrale de LYON, Spécialité: Energie et Systèmes, Année 2008.
39. O. Fanger, Thermal comfort, New York: Mc Graw-Hill, 1972.

40. Standard ASHRAE55, 2004, Thermal environmental conditions for human occupancy. Tech. rep. Atlanta, Georgia, USA: American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers (ASHRAE), 27, 91.
41. V. Olgyay, Design with climate: bioclimatic approach to architectural Regionalism, vol 1 Princeton: Princeton University Press, 1963.
42. V. Olgyay, Bioclimatic orientation method for buildings, Int J Biometeorol 1967; 11(2): 163–74.
43. R.Z. Freire , G.H. Oliveira, N. Mendes, Predictive controllers for thermal comfort optimization and energy savings, Energy Build, 2008, 40(7):1353–65.
44. B. Givoni, Comfort, climate analysis and building design guide lines, Energy Build1992; 18 (1):11–23.
45. K. Labben, Proposition d'un modèle de Processus amont dédié a la conception architecturale climatique basé sur une assistance pars des outils pratique simplifié, Thèse de Doctorat en cotutelle université de Tunis Elmanar et Aix Marseille ,2014.
46. N. Al-Azri, YH. Zurigat and N. Al-Rawahia, Selection and Assessment of Passive Cooling Techniques for Residential Buildings in Oman Using a Bioclimatic Approach, Journal of Engineering Research, December 2013.
47. D. Villermay, Renaissance of bioclimatic architecture, Revue de l'infirmière, Informations 1980;(4):16.
48. Standard ASHRAE55, 2004, Thermal environmental conditions for human occupancy. Tech. rep. Atlanta, Georgia, USA: American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers (ASHRAE), 27, 91.
49. Baruch-Givoni, Passive and Low Energy Cooling of Buildings, Van Nostrand Reinhold, USA, 1994.
50. L. Chahwane, Valorisation de l'inertie thermique pour la performance énergétique des bâtiments, Thèse de Doctorat, Université de Grenoble, spécialité : Génie Civil et Sciences de l'Habitat, Octobre/2011.
51. F.M. Agugliaro, F.G. Montoya, A.S. Ortega, A.G. Cruz, Review of bioclimatic architecture strategies for achieving thermal comfort, Renewable and Sustainable Energy Reviews 49 (2015) 736–755.
52. L. Fang, G. Clausen, P. Fanger, Temperature and Humidity: Important factors for perception of air quality and for ventilation requirements, ASHRAE Transaction, 106 (2) ,2000.
53. D. Nedjraoui, S. Bédrani, La désertification dans les steppes algériennes : causes, impacts et actions de lutte, la revue électronique en science de l'environnement, volume 8 Numéro 1, Avril 2008, Le désert et la désertification : impacts, adaptation et politiques.
54. Data from 1913 - 1938 published in "Le climat de l'Algérie" by SELTZER (1946).

55. Data from 1926 - 1950 for Saharan stations published in "Le climat du Sahara" by DUBIEF (1950 - 1963).
56. S. Foura, Simulation des paramètres du confort thermique d'hiver en Algérie, Thèse de Doctorat , Option : Architecture Bioclimatique, Université Mentouri de Constantine, 2007-2008.

# **Chapitre 4**

## **Diagnostic et Evaluation des Besoins Energétiques Dus à l'Enveloppe**

## 4 . Diagnostic et Evaluation des Besoins Energétiques Dus à l'Enveloppe

La maîtrise de l'énergie n'est pas un médicament que l'on prend en période de crise, de maladie, mais une hygiène de vie qui permet de rester en bonne santé".

Pierre Radanne, ancien Directeur de l'ADEME

### 4.1. Introduction

Les enjeux en matière d'efficacité énergétique sont de plus en plus importants. Au niveau national, où la facture énergétique pèse lourd dans le déficit commercial, le secteur résidentiel est considéré comme étant un secteur énergivore, il présente 36% de la consommation finale. Une partie de cette énergie sert aux besoins de chauffage et de climatisation. Le contrôle du transfert de chaleur est la base de toute action d'amélioration des performances énergétiques du bâtiment, alors si on agit sur les déperditions et apports thermiques du bâtiment, de sorte qu'il soit énergétiquement efficace on pourra réduire la consommation énergétique de ce secteur.

Dans ce présent chapitre, on propose d'étudier les performances énergétiques d'un bâtiment multizone en fonction des propriétés thermo-physiques de son enveloppe et de la zone climatique. L'objectif consiste à identifier la source dominante et la principale raison de la consommation d'énergie élevée. La méthode la plus fiable consiste à fournir une évaluation cohérente des consommations d'énergie d'un immeuble résidentiel type qui ne contient pas de mesures d'efficacité énergétique. Notre approche était basée sur un nouveau modèle pour la prévision des besoins énergétiques dus à l'enveloppe.

Face à ces objectifs, trois wilayas localisées dans différentes zones climatiques "Alger, Tlemcen et Ghardaïa" vont être proposé pour effectuer ces travaux.

## **4.2. Diagnostic des performances énergétiques**

Le diagnostic des performances énergétiques d'un bâtiment (DPE) est une étude qui renseigne sur la quantité d'énergie effectivement consommée ou estimée en termes de chauffage et de climatisation liés au confort thermique. Ceci est fait initialement par le calcul des besoins énergétiques annuels en utilisant une méthode efficace de planification et d'évaluation, celle des degrés-jours de chauffage et de refroidissement [1]. La consommation d'énergie dépend non seulement de la performance thermique de l'enveloppe du bâtiment et des charges internes, mais également de la température d'enregistrement (confort). En conséquence, les besoins de chauffage sont liés aux différences de température en hiver, entre l'intérieur et l'extérieur. Il est donc nécessaire de quantifier et d'analyser les paramètres météorologiques qui influencent les besoins énergétiques. Contrôler le transfert de chaleur dans le bâtiment aide les concepteurs à respecter le compromis entre confort et coût énergétique et proposer des solutions privilégiées.

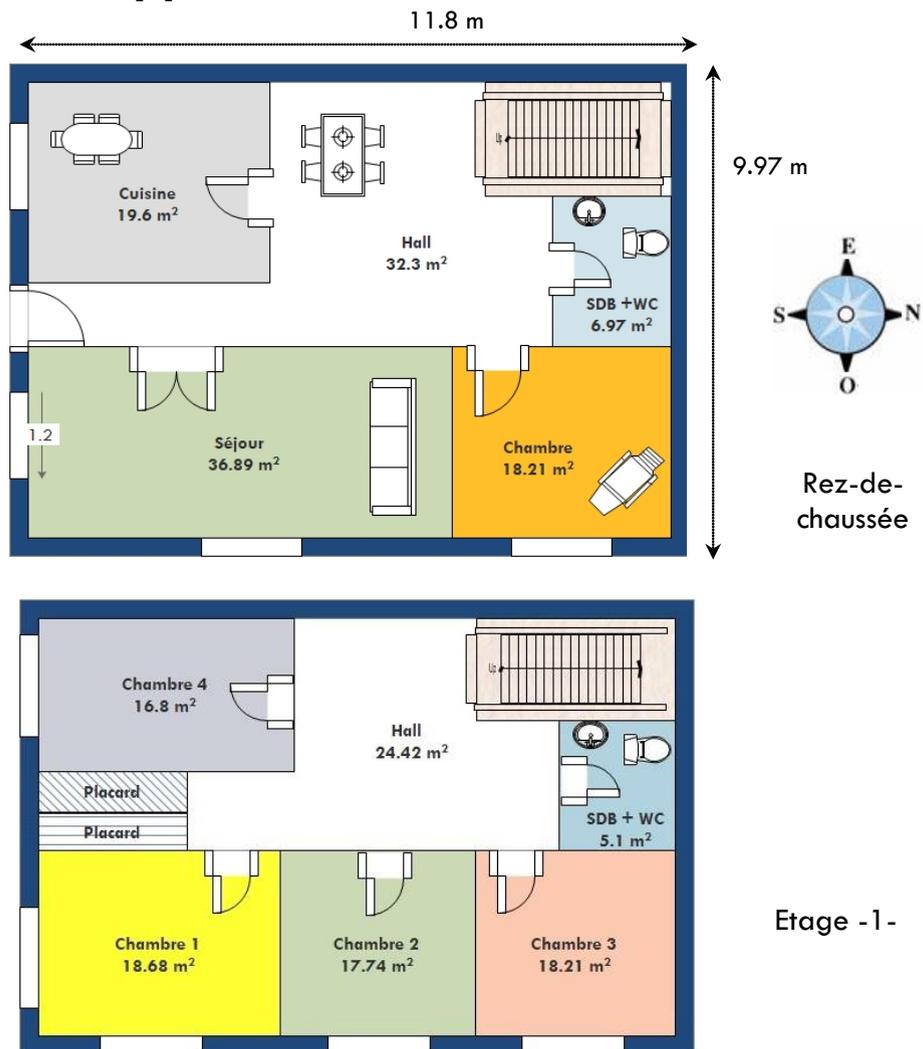
Dans cette contribution, le modèle de bilan énergétique a pour objet le diagnostic permettant d'estimer les consommations énergétiques mensuelles et annuelles d'un immeuble résidentiel type tout en couvrant trois zones climatiques de l'Algérie. Nous recherchons la solution la plus rentable pour réduire les besoins énergétiques correspondants. L'avantage de notre proposition est qu'elle repose sur un nouveau modèle pour la prévision des consommations d'énergie, il représente un couplage entre plusieurs approches référencées et publiées par plusieurs auteurs.

## **4.3. Description du cas étudié**

### **4.3.1. Description de la maison**

La maison étudiée est une structure multizone à trois niveaux, elle dispose d'une superficie qui s'est fixée à 292.994 m<sup>2</sup>. La figure 4.1 décrit la géométrie

et la position des ouvertures dans ce bâtiment. Les fenêtres ( $1.55 \times 2.10 \text{ m}^2$ ) et les portes ( $0.92 \times 2.65 \text{ m}^2$ ) contribuent aussi au bilan énergétique; elles dépendent de plusieurs paramètres tels que: propriétés des matériaux, climat local, orientation, cadre et zones relatives (couvre-plancher) et les performances de dissimulation pendant la nuit et les jours ensoleillés. Ils ont des répercussions importantes sur la consommation d'énergie d'un bâtiment, car ils contribuent aux charges de chauffage et de climatisation d'un bâtiment. Les propriétés thermophysiques des matériaux pour chaque élément du système sont présentées sur le tableau 4.1 [2].



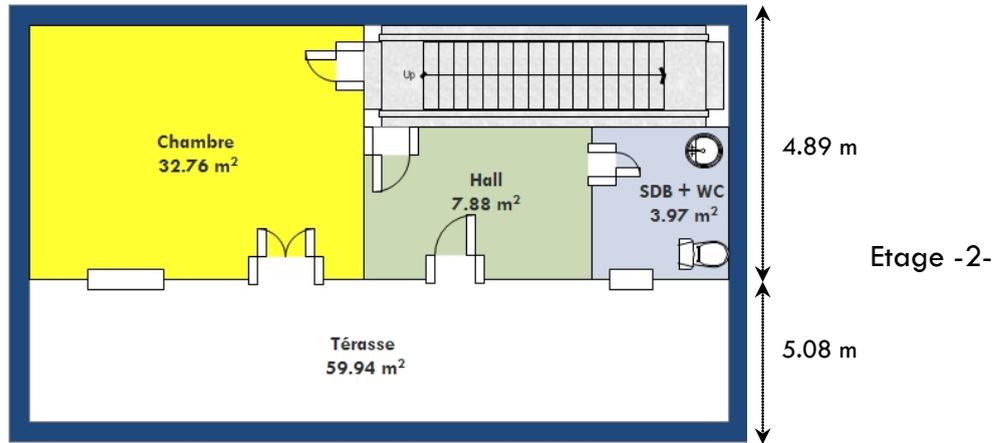


Figure 4.1. Géométrie et plan descriptif du bâtiment résidentiel.

Éléments de construction	Matériaux et Composition de la paroi	Épaisseur de la couche m	Valeurs de transmission thermique U ( $W m^{-2} K^{-1}$ )
Murs extérieurs	Ciment Mortier	0.015	2.6096
	Pierre	0.400	
	Ciment Mortier	0.015	
	Plâtre	0.010	
Plancher	Carrelage	0.025	2.5654
	Ciment	0.100	
	Pierre	0.150	
	Béton lourd	0.180	
Toiture	Carrelage	0.025	3.6955
	Ciment Mortier	0.015	
	Béton	0.120	
	Plâtre	0.015	
Fenêtres avec simple vitrage			5.3400
Portes en bois			3.1959
Ponts thermiques	Plancher bas - mur extérieur		2.3900
	Plancher intermédiaire - mur extérieur		

Tableau 4.1. Propriétés thermophysiques des matériaux de construction pour chaque élément du système

Selon cette fiche technique, ce bâtiment a une mauvaise performance thermique puisqu'il peut générer des déperditions thermiques importantes. Une enveloppe

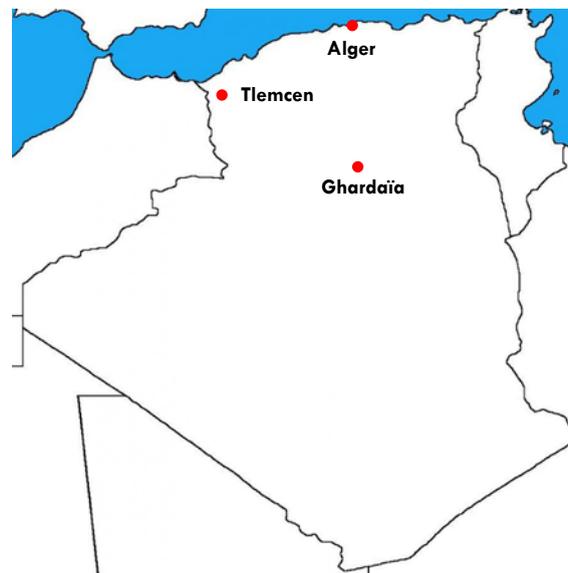
pareille nécessite une isolation thermique fiable. Ceci est souvent synonyme à des coûts énergétiques élevés, c'est pourquoi nous devons avoir d'abord un diagnostic correct de la performance énergétique.

U: Coefficient de transmission de la chaleur de surface par degré de différence entre l'intérieur et l'extérieur ( $W / m^2 K$ ).

La résistance thermique R est une mesure de la capacité d'un matériau à résister au passage de la chaleur. Ainsi, les valeurs U sont calculées par la formule 3.14 du chapitre 3.

#### 4.3.2. Localisation géographique et données climatiques des régions étudiées

Dans cette étude, on s'est intéressé au diagnostic et à l'évaluation des besoins énergétiques dus à l'enveloppe. Une étude comparative a été achevée entre trois sites différents : Tlemcen, Ghardaïa et Alger. Conformément à la classification des régions climatiques menée par le Centre National d'Études et de Recherches Intégrées du Bâtiment "CNERIB", les sites retenus se situent dans les zones climatiques indiquées sur la carte d'Algérie (figure 1.6 du chapitre 1) et le tableau 4.2.



**Figure 4.2.** Localisation géographique des sites climatiques

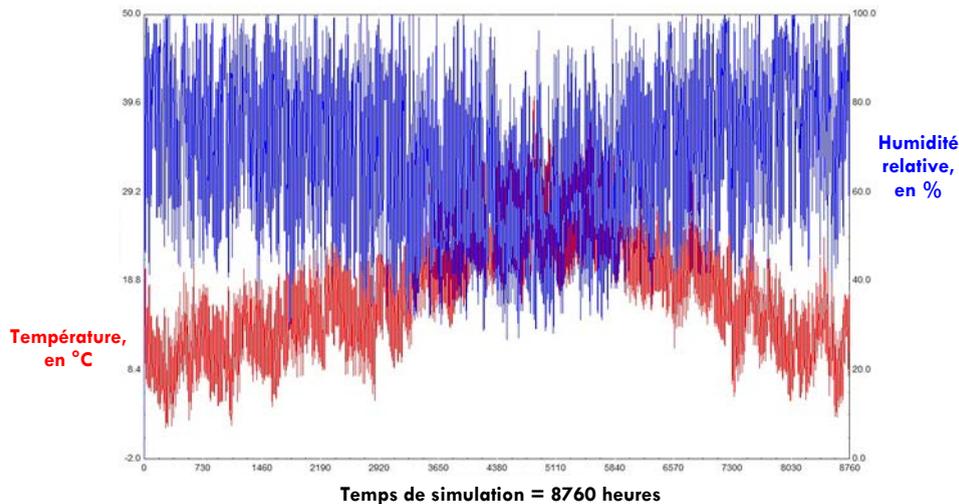
Pour accomplir notre étude, nous avons utilisé le logiciel METEONORM qui permet de générer des fichiers de données climatiques des stations météorologiques les plus proches du site en question (par triangulation). Les particularités géographiques des sites (altitude, versant montagneux...) ont été aussi prises en considération.

Sites	Zones	Altitude	Longitude
Alger	Zone A	36° 47' 24" Nord	3° 1' 4" Est
Tlemcen	Zone B	34° 52' 41" Nord	1° 18' 53" Ouest
Ghardaïa	Zone D	32° 29' 27" Nord	3° 40' 24" Est

**Tableau 4.2.** Zonages climatiques et coordonnées géographiques des trois sites [3].

A cet effet, une méthode de génération des fichiers climatiques annuels en format TMY2 a été développée pour avoir les données mesurées en temps réel pour les trois sites. À partir de ces fichiers, on a pu obtenir la variation de la température ambiante extérieure et l'humidité relative durant toute l'année (figures 4.3-4.5).

Le Chef lieu de la wilaya de Tlemcen est située à 432 km à l'Ouest de la capitale, Alger. Elle a un climat méditerranéen, ouverte aux dépressions maritimes avec un hiver océanique et un été désertique qui provoque la remontée et le stationnement d'une chaleur persistante durant toute la saison.



**Figure 4.3.** Température ambiante et humidité relative pour le site de Tlemcen

Alger, la capitale, est située dans la partie centrale de la côte. Son climat est aussi méditerranéen, en hiver, il fait froid par temps clair, surtout dans les banlieues sud, alors que les journées sont généralement douces. En été, le temps est généralement chaud secs et ensoleillé.

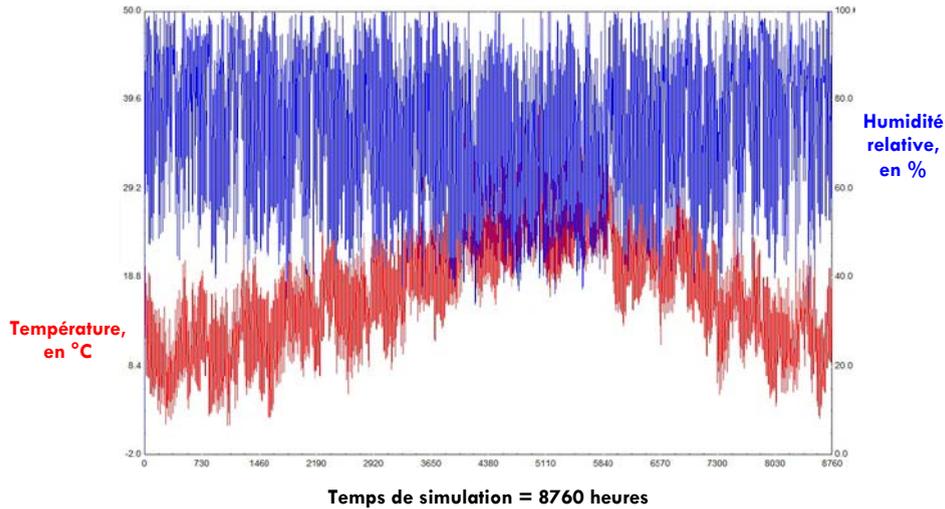


Figure 4.4. Température ambiante et humidité relative pour le site d'Alger

Ghardaïa se trouvant dans la partie Nord du Sahara algérien. Le climat est de type désertique chaud; il se caractérise par un été torride, long et un hiver doux, court aux journées chaudes et aux nuits froides. Le climat reste dominé par les grands écarts thermiques diurnes et annuels.

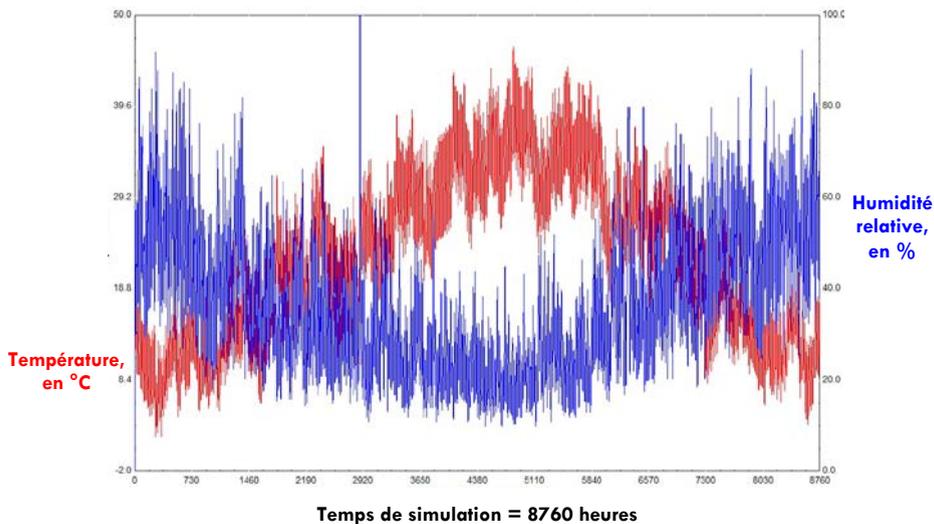


Figure 4.5. Température ambiante et humidité relative pour le site de Ghardaïa

#### 4.4. Besoins énergétiques dus à l'enveloppe

Les besoins énergétiques calculés pour une construction quelconque par degré de différence en température entre l'intérieur et l'extérieur sont exprimés en watts-heure par la formule suivante [1, 4, 5]:

$$Q_{\text{Enveloppe}} = 24 DP_{\text{Enveloppe}} Dj \quad (4.1)$$

$DP_{\text{Enveloppe}}$  : Somme des déperditions thermiques dues aux murs, fenêtres, portes, plafonds, ponts thermiques, sol et à la ventilation, (W/K).

$Dj$ : Nombre de degrés-jours de chauffage et de refroidissement.

$$Q_{\text{Enveloppe}} = DP_{\text{plafonds}} + DP_{\text{murs}} + DP_{\text{sols}} + DP_{\text{portes}} + DP_{\text{fenêtres}} + DP_{\text{ponts}} + DP_{\text{ventil}} \quad (4.2)$$

Chaque terme est calculé par l'une des équations suivantes [1, 4, 5]:

$$DP_{\text{plafonds}} = \sum_{i=1}^{i=n} b_{\text{plafond}_i} S_{\text{plafond}_i} U_{\text{plafond}_i} \quad (4.3)$$

$$DP_{\text{murs}} = \sum_{i=1}^{i=n} b_{\text{mur}_i} S_{\text{mur}_i} U_{\text{mur}_i} \quad (4.4)$$

$$DP_{\text{sols}} = \sum_{i=1}^{i=n} b_{\text{sol}_i} S_{\text{sol}_i} U_{\text{sol}_i} \quad (4.5)$$

$$DP_{\text{portes}} = \sum_{i=1}^{i=n} b_{\text{porte}_i} S_{\text{porte}_i} U_{\text{porte}_i} \quad (4.6)$$

$$DP_{\text{fenêtres}} = \sum_{i=1}^{i=n} b_{\text{fenêtre}_i} S_{\text{fenêtre}_i} U_{\text{fenêtre}_i} \quad (4.7)$$

$S_i$  : la surface ( $m^2$ ).

$b_i$  : le coefficient de réduction des déperditions thermiques.

$U_i$  : le coefficient de transmission thermique par degré de différence entre l'intérieur et l'extérieur ( $W/m^2 K$ ).

La résistance thermique  $R$  mesure l'aptitude d'un matériau à résister au passage d'un flux de chaleur. Ainsi, les valeurs des coefficients de transmission thermique  $U$  seront calculées comme suit:

$$U = \frac{1}{R_{si} + \sum_{i=1}^{i=n} R_i + R_{se}} \quad (4.8)$$

$R_{si}$  : la résistance d'échange thermique superficielle intérieure ( $m^2 K/W$ )

$R_i$  : les résistances thermiques de chaque couche de construction ( $m^2 K/W$ )

$R_{se}$  : la résistance d'échange thermique superficielle extérieure ( $m^2 K/W$ )

Pour les surfaces planes, les valeurs des résistances thermiques qui seront retenues sont données par le tableau 4.3.

	Direction du flux de chaleur		
	Ascendant	Horizontal	Vers le bas
$R_{si}$ ( $m^2 K/W$ )	0.10	0.13	0.17
$R_{se}$ ( $m^2 K/W$ )	0.04	0.04	0.04

**Tableau 4.3.** Valeurs des résistances thermiques superficielles

Pour le calcul du coefficient de réduction, il faut distinguer :

- Les surfaces des parois séparant l'espace non chauffé de la zone chauffée
- Les surfaces des parois séparant la zone non chauffée de l'extérieur, du plancher ou d'un autre espace non chauffé
- Le type de l'espace non chauffé
- L'état de l'isolation thermique des parois adjacentes à l'espace non chauffé
- L'état de l'isolation thermique de l'espace non chauffé

Pour un mur en contact avec l'extérieur,  $b = 1$ .

Pour un mur enterré ou un plancher sur vide sanitaire,  $b = 0.8$ .

Les valeurs du coefficient de réduction des déperditions thermiques doivent être données en fonction d'un rapport de surface et d'un coefficient équivalent  $U$  des différentes parois.

Pour les bâtiments adjacents autres que d'habitation,  $b = 0.2$ . Dans les autres cas, les valeurs du coefficient de réduction des pertes de chaleur doivent être

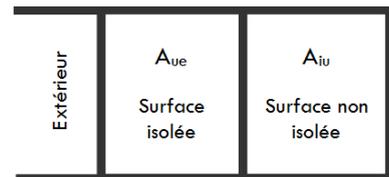
données dans les tableaux ci-dessous en fonction du rapport de surface  $A_{iu} / A_{ue}$  et le coefficient équivalent U.

$R = A_{iu}/A_{ue}$	$U_{v,ue} (W/m^2 K)$			
	0.0	0.3	3.0	9.0
$R \leq 0.25$	0.80	0.85	0.90	0.95
$0.25 < R \leq 0.50$	0.65	0.75	0.80	0.90
$0.50 < R \leq 0.75$	0.55	0.65	0.75	0.85
$0.75 < R \leq 1.00$	0.50	0.55	0.70	0.80
$1.00 < R \leq 1.25$	0.45	0.50	0.65	0.80
$1.25 < R \leq 2.00$	0.35	0.40	0.50	0.70
$2.00 < R \leq 2.50$	0.30	0.35	0.45	0.65
$2.50 < R \leq 3.00$	0.25	0.30	0.40	0.60
$3.00 < R \leq 3.50$	0.20	0.30	0.40	0.55
$3.50 < R \leq 4.00$	0.20	0.25	0.35	0.50
$4.00 < R \leq 6.00$	0.15	0.20	0.25	0.40
$6.00 < R \leq 8.00$	0.10	0.15	0.20	0.35
$8.00 < R \leq 10.00$	0.10	0.10	0.20	0.30
$10.00 < R \leq 25.00$	0.05	0.10	0.15	0.25
$25.00 < R \leq 50.00$	0.05	0.05	0.05	0.15
$R > 50.00$	0.00	0.00	0.05	0.05



**Tableau 4.4 :** Coefficient de réduction des pertes de chaleur en fonction du coefficient de transmission thermique surfacique et du rapport de surface  $A_{iu} / A_{ue}$  [4]

$R = A_{iu}/A_{ue}$	$U_{v,ue} (W/m^2 K)$			
	0.0	0.3	3.0	9.0
$R \leq 0.25$	0.35	0.50	0.85	0.95
$0.25 < R \leq 0.50$	0.20	0.35	0.70	0.90
$0.50 < R \leq 0.75$	0.15	0.25	0.65	0.85
$0.75 < R \leq 1.00$	0.15	0.20	0.55	0.80
$1.00 < R \leq 1.25$	0.10	0.15	0.50	0.75
$1.25 < R \leq 2.00$	0.05	0.10	0.40	0.65
$2.00 < R \leq 2.50$	0.05	0.10	0.35	0.60
$2.50 < R \leq 3.00$	0.05	0.10	0.30	0.55
$3.00 < R \leq 3.50$	0.05	0.05	0.25	0.50
$3.50 < R \leq 4.00$	0.05	0.05	0.25	0.45
$4.00 < R \leq 6.00$	0.00	0.05	0.20	0.35
$6.00 < R \leq 8.00$	0.00	0.05	0.15	0.30
$8.00 < R \leq 10.00$	0.00	0.05	0.10	0.25
$10.00 < R \leq 25.00$	0.00	0.00	0.10	0.20
$25.00 < R \leq 50.00$	0.00	0.00	0.05	0.10
$R > 50.00$	0.00	0.00	0.00	0.05



**Tableau 4.5 :** Coefficient de réduction des pertes de chaleur en fonction du coefficient de transmission thermique surfacique et du rapport de surface  $A_{iu} / A_{ue}$  [4]

Les déperditions thermiques dues aux ponts thermiques sont données par l'équation suivante [1, 4, 5]:

$$\begin{aligned}
 DP_{\text{ponts thermiques}} = & \sum_{i,j} b_{pb\_i/m\_j} k_{pb\_i/m\_j} l_{pb\_i/m\_j} + \sum_{i,j} b_{pi\_i/m\_j} k_{pi\_i/m\_j} l_{pi\_i/m\_j} \\
 + & \sum_{i,j} b_{ph\_i/m\_j} k_{ph\_i/m\_j} l_{ph\_i/m\_j} + \sum_{i,j} b_{rf\_i/m\_j} k_{rf\_i/m\_j} l_{rf\_i/m\_j} + \sum_{i,j} b_{men\_i/m\_j} k_{men\_i/m\_j} l_{men\_i/m\_j}
 \end{aligned}
 \tag{4.9}$$

$l_{pb\_i/m\_j}$  : longueur du pont thermique, plancher bas i - mur j

$l_{pi\_i/m\_j}$  : longueur du pont thermique, étage intermédiaire i - mur j

$l_{ph\_i/m\_j}$  : longueur du pont thermique, étage supérieur i - mur j

$l_{rf\_i/m\_j}$  : longueur du pont thermique, mur de cisaillement i - mur j.

$$l_{rf\_i/m\_j} = 2 h_{\text{Moy\_Plaf}} (N_{\text{appart}} - N_{\text{niv}})
 \tag{4.10}$$

$h_{\text{Moy\_Plaf}}$  : la hauteur moyenne du plafond

$N_{\text{appart}}$  : nombre d'appartements

$N_{\text{niv}}$  : nombre de niveaux.

$l_{men\_i/m\_j}$  : la longueur du pont thermique, charpenterie i - mur j

$k$  : conductivité thermique (W/m K)

Pour calculer les déperditions thermiques dues à la ventilation, nous devons se baser sur les données suivantes:

- Menuiserie : avec ou sans joint
- Surface adjacente avec l'extérieur à l'exception du plancher bas
- Surface habitable
- Type de ventilation

La ventilation des locaux est obligatoire, pour ce faire, un débit minimal doit être assuré afin d'éviter les inconforts. Afin de réduire les dépenses énergétiques, un soin tout particulier doit être apporté au choix et à la mise en œuvre des composants. L'étanchéité doit être réalisée le mieux possible car les fuites dans les parties chauffées augmentent les débits entrants et donc les déperditions. Le défaut d'étanchéité de l'enveloppe du bâtiment (perméabilité) joue aussi un grand rôle dans les déperditions thermiques. Ces défauts d'étanchéité sont multiples:

- Joints des ouvrants de mauvaise qualité

- Linéiques des ouvrants non rendus étanches par application de mousse expansive ou tout autre procédé.
- Appuis de fenêtres scellés sur les côtés mais non par le dessous
- Murs extérieurs en maçonnerie courante, briques ou parpaings, maçonnés avec trop de jeu...etc.

$$DP_{\text{ventilation}} = DP_{\text{vent}} + DP_{\text{perm}} \quad (4.11)$$

Avec :

$$DP_{\text{vent}} = 0.34 \theta_{\text{conv}} S_h \quad (4.12)$$

$\theta_{\text{conv}}$  : Débit d'air extrait conventionnel par unité de surface habitable ( $\text{m}^3/\text{h}/\text{m}^2$ )

$S_h$  : Surface habitable ( $\text{m}^2$ )

La surface habitable représente la somme des surfaces de plancher de chaque pièce à laquelle il faut retirer les surfaces occupées par les murs, cloisons, marches et cages d'escaliers, gaines, embrasures de portes et de fenêtres. Certains espaces de l'habitation (balcons, garage, cave...) ne sont pas compris dans la surface habitable.

$$DP_{\text{perm}} = 0.34 \eta_{\text{inf}} \quad (4.13)$$

$\eta_{\text{inf}}$  : Ecoulement d'air dû à l'infiltration causée par les phénomènes thermiques ( $\text{m}^3/\text{h}$ )

$$\eta_{\text{inf}} = 0.0146 \eta_{4\text{pa}} \left( 0.7 \left| 19 - T_{\text{ex}_{\text{moy}}} \right| \right)^{0.667} \quad (4.14)$$

$T_{\text{ex}_{\text{moy}}}$  : La valeur moyenne de la température extérieure ( $^{\circ}\text{C}$ ).

$$\eta_{4\text{pa}} = \eta_{4\text{pa}_{\text{env}}} + 0.45 S_{\text{me}_{\text{conv}}} S_h \quad (4.15)$$

$\eta_{4\text{pa}}$  : La perméabilité sous 4 Pa de la zone ( $\text{m}^3/\text{h}$ )

$\eta_{4\text{pa}_{\text{env}}}$  : La perméabilité de l'enveloppe ( $\text{m}^3/\text{h}$ )

$S_{\text{me}_{\text{conv}}}$  : Valeur conventionnelle de la somme des modules d'entrée d'air de moins de 20 Pa par unité de surface habitable ( $\text{m}^3/\text{h}/\text{m}^2$ )

$$\eta_{4\text{pa}_{\text{env}}} = \eta_{4\text{pa}_{\text{env}/\text{m}^2}} S_{\text{dep}} \quad (4.16)$$

$\eta_{4pa\_env/m^2}$  : Valeur conventionnelle de la perméabilité sous 4 Pa ( $m^3/h$ )

$S_{dep}$  : Surface déperditive hors plancher bas ( $m^2$ ).

Pour une fenêtre sans joint  $\eta_{4pa\_env/m^2} = 2.5 m^3/h$ , pour d'autres cas, il est égal à  $1.7 m^3/h$ .

En cas d'échange d'air, et le système de ventilation est réalisé dans les ouvertures d'entrée haute et basse, les valeurs correspondantes de  $S_{me_{conv}}$  et  $\theta_{conv}$  sont respectivement 4 et 2.150 [4,6].

#### 4.5. Choix d'un modèle de confort adaptatif

Les études existantes montrent que l'homme peut s'adapter à l'environnement grâce à ses initiatives. Les températures peuvent être corrélées à la température extérieure: lorsqu'elle accroît, la température ambiante intérieure augmente également et inversement en cas de baisse. Le modèle de confort adaptatif propose donc de fournir une température corrélée positivement à la température moyenne extérieure. Ce modèle se pose en alternative au modèle thermique statique, qui propose de fournir toute l'année une température constante. Cette dernière sera définie en fonction des différents critères tels que la température, l'humidité relative de l'air, ou le niveau d'isolation thermique des vêtements.

A travers la littérature, il a été constaté que la température du confort à l'intérieur d'une construction à ventilation naturelle peut être prédite par des équations linéaires. Elle peut être exprimée en fonction de la température extérieure [7-9]:

$$T_{conf} = a T_{moy\_ext} + b \quad (4.17)$$

#### 4.6. Les degrés-jours

L'évaluation des besoins énergétiques dus à l'enveloppe requiert une prise en compte de l'écart en température entre l'ambiance intérieure et extérieure. La

méthode des degrés jours est une méthode qui nécessite un nombre de données relativement réduit pour l'estimation des besoins énergétiques d'un bâtiment. Elle permet aussi d'identifier l'impact de l'intégration des mesures d'efficacité énergétique dans un bâtiment notamment au niveau de l'enveloppe (isolation des murs, des toitures, taux de vitrage...). La clé d'une bonne utilisation de cette méthode est le choix de la température de base. Elle dépend de la température de consigne choisie, du coefficient de transmission thermique global du bâtiment et des gains internes [10].

En effet, le nombre des degrés jours de chauffage peut changer significativement avec le changement de la température de base. La figure 4.7 donne les variations mensuelles des degrés jours pour trois wilayas appartenant à des zones climatiques différentes.

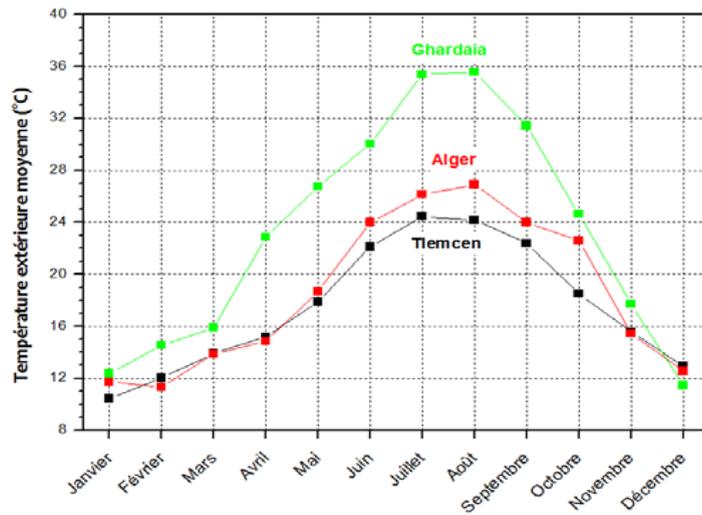
La température neutre mensuelle est obtenue en utilisant l'équation d'Auliciems [11,12]:

$$T_{\text{conf}} = 0.31 T_{\text{moy\_ext}} + 17.6 \quad (4.18)$$

- Pour le site d'Alger, les températures de confort sont entre 21.12 °C et 25.94 °C. Il est cependant possible de prolonger cette zone de confort par +/- 2 °C, ce qui donne une gamme de température adaptatif entre 19.12 et 27.94 °C.
- Pour le site de Tlemcen, les températures de confort sont entre 20.83 °C et 25.18 °C en été. De même, en prolongeant la zone du confort par +/- 2 °C, il est possible d'étendre la zone du confort du 18.83 au 27.18 °C.
- Pour Ghardaïa, les températures du confort varient entre 21.16 °C et 28.63 °C. Si on prolonge cette zone par +/- 2 °C, on obtient un intervalle de confort adaptatif entre 19.16 et 30.63 °C.

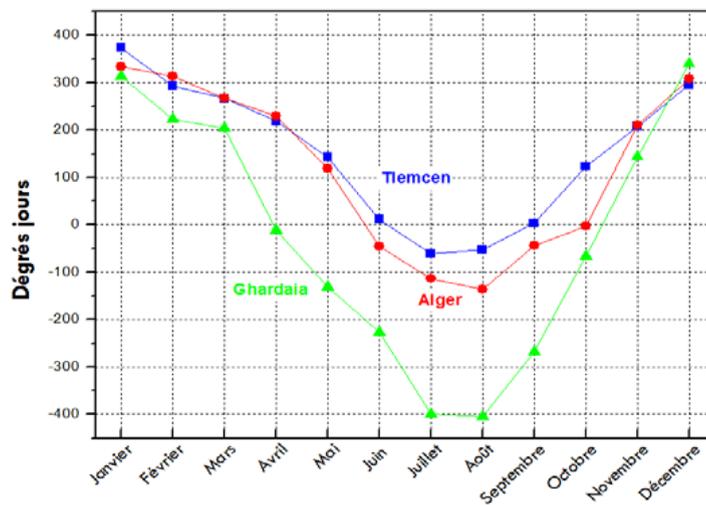
$$DJ = \text{Nombre de jours} \left( T_{\text{conf}} - T_{\text{moy\_ext}} \right) \quad (4.19)$$

La figure 4.6 donne les valeurs moyennes de la température extérieure pour les trois sites en question.



**Figure 4.6.** Variations de la température extérieure moyenne pour les trois régions climatiques

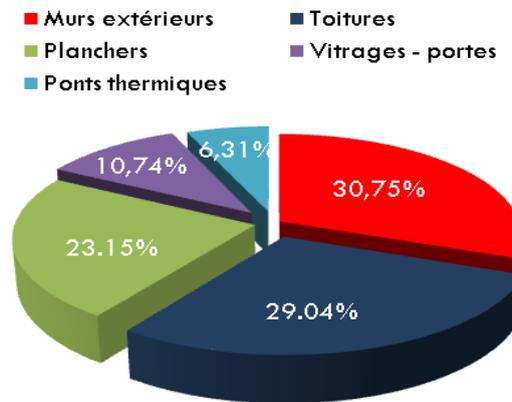
Selon ces courbes, le nombre de degrés jours de chauffage (DJC) est nettement important dans les régions de Tlemcen et Alger, ce qui résulte ainsi des besoins en chauffage plus importants. Réciproquement, dans les régions désertiques, comme Ghardaïa, le nombre de degrés jours de refroidissement (DJR) est plus intéressant, ce qui engendre par conséquent des besoins énergétiques plus importants en termes de climatisation.



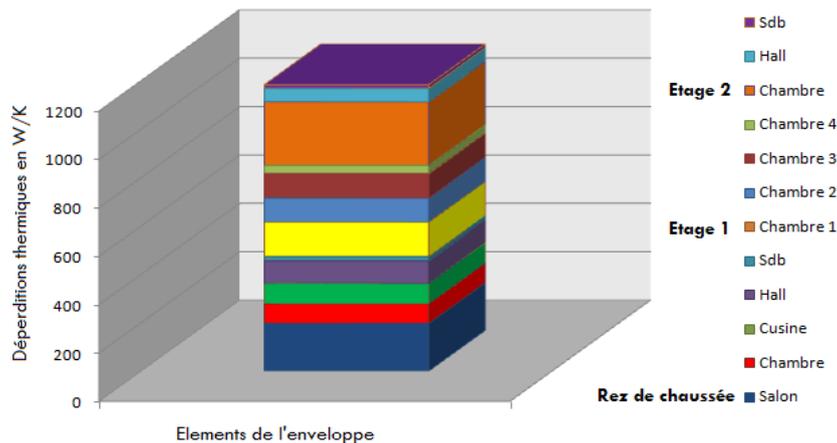
**Figure 4.7.** Variations des degrés jours pour les trois régions climatiques

#### 4.7. Déperditions thermiques

Avant d'entamer la partie consacrée aux besoins énergétiques mensuels et annuels de chauffage et climatisation, il faut avoir d'abord une idée sur les différentes sources de déperditions thermiques. Nous les exprimons donc en pourcentage par rapport aux besoins énergétiques (dus à l'enveloppe) totaux. Les résultats affichés sur la figure 4.8 et 4.9 concernent les trois zones climatiques puisque ce diagnostic ne prend pas en considération les échanges thermiques par renouvellement d'air. Si c'est l'inverse, il faut attribuer une quantification zone par zone puisque l'échange de chaleur par renouvellement d'air dépend principalement de la température ambiante du milieu extérieure.

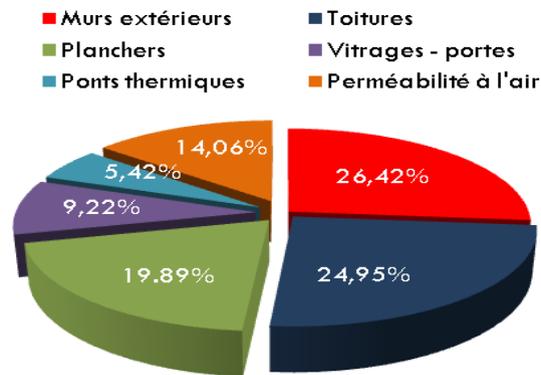


**Figure 4.8.** La part des déperditions thermiques dues à l'enveloppe du bâtiment (pas de renouvellement d'air)



**Figure 4.9.** Part des déperditions thermiques par élément de l'enveloppe (pas de renouvellement d'air)

Les résultats de la figure 4.10 se sont basés sur une température moyenne annuelle qui s'est estimée à environ 16 °C. Cette valeur correspond au site de Tlemcen qui a été retenu pour réaliser cette étude en présence d'une ventilation naturelle.



**Figure 4.10.** La part des déperditions thermiques dues à l'enveloppe du bâtiment (Cas de Tlemcen avec renouvellement d'air)

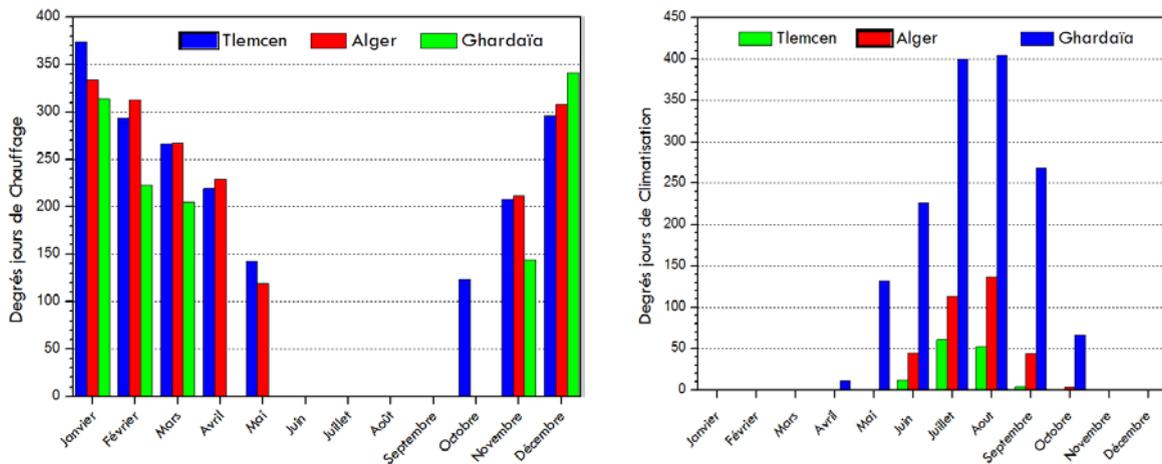
Ces démarches nous ont permis de conclure que le toit, les murs extérieurs et le sol sont les principales sources de déperditions thermiques. En englobant tous les cas étudiés "pour toutes les zones climatiques", même si certains résultats ne sont affichés, il a été constaté que les déperditions thermiques dues à ces derniers éléments représentent plus de 70 % des déperditions thermiques totales. Par conséquent, on peut juger que la meilleure façon de réduire la consommation énergétique et limiter ces déperditions consiste à intégrer une isolation thermique performante.

#### 4.8. Besoins énergétiques dus à l'enveloppe

Ces dernières années un nombre important de logements a été construit sans prendre en considération la qualité thermique. Cette situation a causé une surconsommation énergétique en matière de chauffage et de climatisation. C'est pour cette raison qu'on s'est intéressé à la détermination des charges énergétiques dans ces trois sites. Les résultats qui vont être fournis seront accomplis par l'aspect financier. Nous déduisons chaque fois la facture

énergétique correspondante sans oublier de mettre l'accent sur les subventions de l'état (il est à noter que le prix réel du kilowattheure est de 10.54 DZD).

Par ailleurs, nous signalons que le modèle du confort thermique est supposé statique, c'est-à-dire, nous avons proposé une température constante durant toute l'année. Elle s'est fixée à 23 °C pour assurer une comparaison judicieuse des besoins énergétiques entre les trois régions climatiques. Ce choix nous a permis d'éviter d'avoir des températures du confort mensuelles différentes d'un site à un autre. Cet aspect se réalisera si on utilise l'équation d'Auliciens pour la détermination du confort thermique. La figure 4.11 représente la variation du nombre de degrés jours de chauffage DJCH et de refroidissement DJR pour les trois wilayas.



**Figure 4.11.** Variations des degrés jours de chauffage DJCH et de refroidissement DJR pour les trois régions climatiques

Les tableaux ci-dessous donnent les valeurs mensuelles et annuelles de l'énergie requise qui permet de maintenir une température intérieure fixe (23 °C) dans toutes les zones de l'habitat durant toute l'année. La consommation sera exprimée en kilowattheures (kWh).

## Chapitre 4 : Diagnostic et Evaluation des Besoins Energétiques Dus à l'Enveloppe

Mois	Température moyenne extérieure En °C	Nombre de degré jour Dj	Sans échange d'air				Avec échange d'air (ventilation naturelle)			
			Besoins en kWh	Factures (DZD)		Subvention de l'état En %	Besoins en kWh	Factures (DZD)		Subvention de l'état
				Réelle	CREG			Réelle	CREG	
Janvier	10.43	+ 374.17	11338.96	119512.64	185 342.76	37.90	13209.51	139228.23	215 762.98	37.85
Février	12.01	+ 293.72	8900.98	93816.33			10352.29	109113.14		
Mars	13.90	+ 266.6	8079.13	85154.03			9376.28	98825.99		
Avril	15.20	+ 219	6636.64	69950.18	73 394.49	38.50	7689.58	81048.17	85 097.82	38.36
Mai	17.89	+ 142.91	4330.79	45646.53			4996.62	52664.37		
Juin	22.11	+ 11.7	354.56	3737.06			411.66	4338.90		
Juillet	24.46	- 60.76	1841.29	19407.20	21 477.63	40.73	2137.82	22532.62	25 883.99	40.20
Août	24.19	- 52.39	1587.64	16733.72			1842.75	19422.58		
Septembre	22.38	+ 3.6	09.09	95.81			126.33	1331.52		
Octobre	18.50	+ 124	3757.73	39606.47	124 217.92	38.10	4329.51	45633.03	144 120.55	38.02
Novembre	15.56	+ 208.2	6309.36	66500.65			7306.82	77013.88		
Décembre	12.95	+ 296.05	8971.59	94560.56			10423.54	109864.11		
Année	17.46		62117.76	654721.19	404432.80	38.23	72202.71	761016.56	470865.34	38.13

**Tableau 4.6.** Besoins énergétiques dus à l'enveloppe, les factures correspondantes et la subvention de l'état, cas de Tlemcen

Mois	Température moyenne extérieure En °C	Nombre de degré jour Dj	Sans échange d'air				Avec échange d'air (ventilation naturelle)			
			Besoins en kWh	Factures (DZD)		Subvention de l'état En %	Besoins en kWh	Factures (DZD)		Subvention de l'état En %
				Réelle	CREG			Réelle	CREG	
Janvier	11.72	+ 334.18	10127.09	106739.53	181 479.37	37.89	11781.93	124181.54	211 188.35	37.84
Février	11.32	+ 313.04	9486.46	99987.29			11041.27	116374.99		
Mars	13.87	+ 267.53	8107.31	85451.05			9409.30	99174.02		
Avril	14.85	+ 229.5	6954.84	73304.01	77 395.84	38.38	8061.94	84972.85	89 718.12	38.26
Mai	18.67	+ 118.73	3598.03	37923.24			4143.51	43672.59		
Juin	24.00	- 45	1363.69	14373.29			1582.44	16678.92		
Juillet	26.15	- 113.15	3428.93	36140.92	57 519.30	38.67	3988.70	42040.90	67 082.39	38.52
Août	26.90	- 136.4	4133.50	43567.09			4812.09	50719.43		
Septembre	23.97	- 44.1	1336.42	14085.87			1550.74	16344.80		
Octobre	22.60	- 3.1	93.94	990.13	103 304.37	38.16	108.81	1146.86	120 078.66	38.07
Novembre	15.45	+ 211.5	6409.36	67554.65			7423.75	78246.32		
Décembre	12.55	+ 308.45	9347.36	98521.17			10865.01	114517.20		
Année	18.50		64386.93	678638.24	419698.88	38.15	74769.49	788070.42	488067.52	38.07

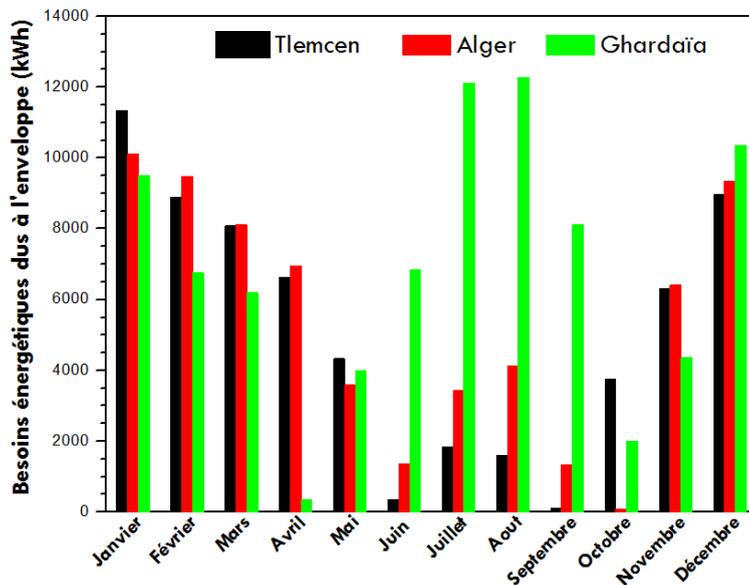
**Tableau 4.7.** Besoins énergétiques dus à l'enveloppe, les factures correspondantes et la subvention de l'état, cas d'Alger

<sup>1</sup> CREG : Commission de régulation de l'électricité et du gaz

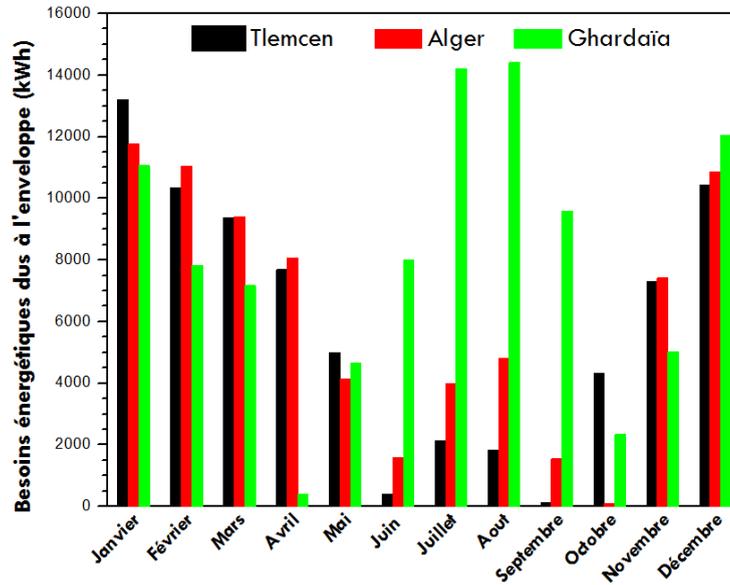
Mois	Température moyenne extérieure En °C	Nombre de degré jour Dj	Sans échange d'air				Avec échange d'air (ventilation naturelle)			
			Besoins en kWh	Factures (DZD)		Subvention de l'état En %	Besoins en kWh	Factures (DZD)		Subvention de l'état En %
				Réelle	CREG			Réelle	CREG	
Janvier	12.37	+ 314.03	9516.46	100303.49	146 903.57	37.97	11063.75	116611.92	170 626.21	37.91
Février	14.54	+ 222.88	6754.22	71189.48			7832.50	82554.55		
Mars	15.90	+ 204.6	6200.26	65350.74			7177.04	75646.00		
Avril	22.87	- 11.1	336.37	3545.34	72 508.47	38.44	389.78	4108.28	84 731.93	38.31
Mai	26.75	- 131.75	3992.59	42081.90			4647.31	48982.65		
Juin	30.03	- 225.9	6845.74	72154.10			7993.98	84256.55		
Juillet	35.40	- 399.9	12118.69	127730.99	212 993.03	37.83	14216.82	149845.28	250 513.60	37.78
Août	35.57	- 405.17	12278.40	129414.34			14406.12	151840.50		
Septembre	31.42	- 267.6	8109.43	85473.39			9580.48	100978.26		
Octobre	24.64	- 66.34	2010.38	21189.40	109 073.53	38.13	2334.64	24607.11	126 796.80	38.05
Novembre	17.70	+ 144	4363.82	45994.66			5036.63	53086.08		
Décembre	11.48	+ 341.62	10352.56	109115.98			12047.35	126979.07		
Année	23.22		82878.92	873543.82	541478.60	38.01	96726.40	1019496.26	632668.54	37.94

**Tableau 4.8.** Besoins énergétiques dus à l'enveloppe, les factures correspondantes et la subvention de l'état, cas de Ghardaïa

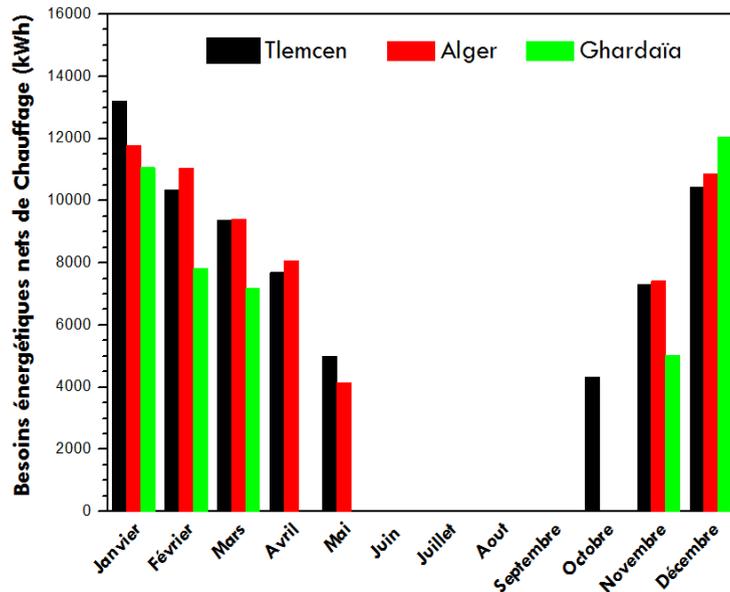
Les figures 4.12 et 4.13 représentent les résultats achevés de l'étude comparative des besoins énergétiques dus à l'enveloppe pour les trois régions climatiques. Cette comparaison a été exposée par une description des besoins énergétiques mensuels selon le site et conformément à la méthode adoptée précédemment.



**Figure 4.12.** Comparaison en termes de besoins énergétiques mensuels dus à l'enveloppe, selon le site d'implantation de l'édifice et en absence d'une ventilation

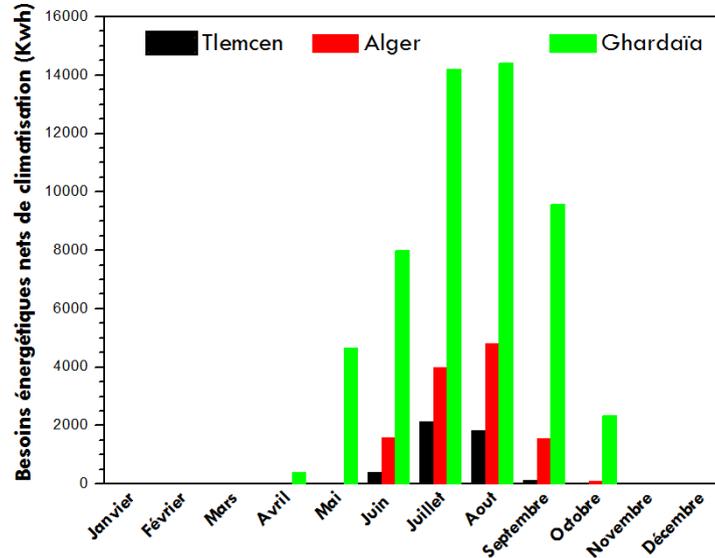


**Figure 4.13:** Comparaison en termes de besoins énergétiques mensuels dus à l'enveloppe, selon le site d'implantation de l'édifice et dans le cas d'une ventilation naturelle



**Figure 4.14:** Comparaison en termes de besoins énergétiques mensuels de chauffage, selon le site d'implantation de l'édifice et dans le cas d'une ventilation naturelle

En se basant sur les résultats obtenus, ce type de bâtiment est très gourmand en énergie s'il est localisé à la région de Ghardaïa. La consommation énergétique due à l'enveloppe s'est arrêtée à 82878.92 kWh. Pour une habitation située à Tlemcen et Alger, les besoins énergétiques dus à l'enveloppe s'élèvent à 62117.76 kWh et 64386.93 kWh respectivement.



**Figure 4.15:** Comparaison en termes de besoins énergétiques mensuels de climatisation, selon le site d'implantation de l'édifice et dans le cas d'une ventilation naturelle

Le site de Tlemcen est caractérisé par une période de chauffage plus longue, elle s'étend du mois d'Octobre au mois de Mai. C'est légitime vu que le nombre de degrés jour de chauffage est le plus important en le comparant ceux des autres sites (Alger et Ghardaïa). Les besoins en climatisation sont très élevés à Ghardaïa en raison des nombres de degrés jour qui sont très élevés. C'est une spécificité relative aux régions sahariennes en générale. La consommation peut atteindre des valeurs record en mois d'Août.

Cependant, les échanges thermiques dus au renouvellement d'air entraînent une augmentation de la consommation énergétique. Elle est estimée à 16.23 %, 16.12 % et 16.70 % pour respectivement les régions de Tlemcen, Alger et Ghardaïa. En ce qui concerne les factures énergétiques, le citoyen doit consacrer une part très importante de leur revenu pour payer sa facture énergétique. Le montant affiché est flagrant même si on ignore la subvention de l'état. Les factures énergétiques réelles donc constituent la première source d'information sur la consommation énergétique de ce bâtiment.

De ce fait, dans le secteur du bâtiment, l'énergie demeure l'un des premiers pourvoyeurs des subventions de l'État. L'Algérie continue à consacrer des

montants importants du budget de l'état pour l'énergie. Les dépenses consacrées au soutien de l'état en matière d'énergie dans ce secteur se rapprochent de 38% par rapport au prix réel annoncé, 10.54 DZD/kWh [13]. En réalité, pour la région de Ghardaïa, la subvention est plus importante, les résultats affichés sur les tableaux ne tiennent pas en compte le soutien d'état par rapport aux régions du Nord. Si, c'est le cas, actuellement la subvention de l'état pour les régions du Sud dépasse les 70%. Cette situation donc complique énormément les politiques budgétaires nationales. Ce modèle de consommation est insoutenable, nous allons tout droit vers une incapacité à maintenir un meilleur développement économique.

#### 4.9. Conclusion

Dans ce chapitre, on a pu proposer une étude sur les performances énergétiques d'un bâtiment en fonction des propriétés thermo-physiques de son enveloppe sous les climats de trois sites de différents régimes climatiques. On a pu identifier les principales sources de déperditions thermiques. La méthode suivie nous a permis de fournir une évaluation cohérente des consommations d'énergie dues à l'enveloppe d'un immeuble résidentiel type qui ne contient pas de mesures d'efficacité énergétique. Notre approche était basée sur un nouveau modèle pour la prévision ces besoins énergétiques.

Les échanges thermiques liés au renouvellement d'air entraînent une surconsommation énergétique située entre 16 et 17 %.

Les subventions en matière d'énergie dans ce secteur se rapprochent de 38% par rapport au prix réel annoncé pour les régions du Nord et dépassent les 70% pour les régions du Sud.

Les subventions à l'énergie représentent, en fait, une grande partie des subventions de l'État. Pour faire face à ces contraintes, une rénovation de ces types de bâtiments s'impose, ceci exige d'importants investissements. Cette recommandation sur la performance énergétique est un élément fondamental pour améliorer l'efficacité énergétique en générale.

Pour y faire face, l'Algérie doit faire un choix bien difficile : faut-il continuer à dépenser plus en subventions pour permettre aux citoyens d'avoir une énergie bon marché, ou faut-il diminuer, voire éliminer, les subventions à l'énergie et laisser le marché s'autoréguler ? [14]

- Que faire pour rationaliser la consommation interne d'énergie ? [14]
- Comment réduire et/ou éliminer les subventions à l'énergie ? [14]

Le chapitre suivant propose certaines solutions qui vont répondre partiellement à ces questions.

### Références

1. S. Belgherras, S.M.A. Bekkouche, T. Benouaz, N. Benamrane, Prospective analysis of the energy efficiency in a farm studio under Saharan weather conditions, *Energy and Buildings*, 145, 342–353, 2017.
2. S. Larsen, C. Filippín, G. Lesino, Thermal behavior of building walls in summer: Comparison of available analytical methods and experimental results for a case study, *Building Simulation* (2009) 2: 3–18.
3. Document Technique Réglementaire, D.T.R. C 3-4, Règles de calcul des apports calorifiques des bâtiments, climatisation, Centre National d'Etudes et de Recherches Intégrées du Bâtiment 1998.
4. Bekkouche, S.M.A., Benouaz, T., Hamdani, M., Cherier, M.K., Yaiche, M.R., Benamrane, N., Diagnosis and comprehensive quantification of energy needs for existing residential buildings under Sahara weather conditions, *Advances in Building Energy Research*, Pages 37-51, 2016.
5. Cherier, M.K., L'utilisation passive de l'énergie solaire dans les habitats de Ghardaïa, Doctorat en Sciences Spécialité Énergies Renouvelables, Université Abou-bakr belkaïd, Tlemcen, Juin 2018.
6. NOR: ETL1234842A, Méthode 3CL-DPE v1.3, JORF n°0262 du 10 Novembre 2012, Annexe 1.
7. M. Humphreys, Field studies of thermal comfort compared and applied, *J. Heat and Vent. Eng* 44 5-27.
8. A. Auliciems, R. Dear, Air conditioning in Australia I, *Human thermal factors, Architectural Science Review*, 29, 67-75.
9. J.F. Nicol, I.A. Raja, Time and thermal comfort in naturally ventilated buildings, *Proc. Int., Workshop on passive cooling*, M. Santamouris (ed), Athens 1995.
10. R. Idchabani, M. Elganaoui, M. Garoum, Besoins énergétiques et impact environnemental du chauffage des bâtiments résidentiels au Maroc, Laboratoire

d'énergie, matériaux et environnement, Ecole supérieure de technologie de Salé, faculté des Sciences de Raba, 2010.

11. S.V. Szokolay, Introduction to architectural science, the basis of sustainable design, Second edition, Steven Szokolay, Published by Elsevier 2008.
12. A. Auliciems, S. Szokolay, Thermal comfort, PLEA Note 2, passive and low energy architecture, 1997.
13. Le journal de l'emploi, 2016, "SONELGAZ: Campagne de sensibilisation pour rationaliser la consommation de l'électricité", le journal de l'emploi. Site web : <http://lecourrier-dalgerie.com/bejaia-campagne-de-sensibilisation-pour-rationaliser-la-consommation-de-lelectricite/>
14. Subventions à l'énergie: Un gouffre financier qui mine le Trésor public. Site web : <https://www.algerie-eco.com/2016/11/10/subventions-a-lenergie-gouffre-financier-tresor-public/>

# **Chapitre 5**

## **Amélioration de l'efficacité Énergétique Principales Solutions**

## 5 . Amélioration de l'Efficacité Energétique & Principales Solutions

" Chaque région climatique du monde a développé un type d'habitat spécifique : chaque fois la structure et les détails constructifs de ces bâtiments correspondent à une adaptation au climat local si efficace que, répétés à l'envi, ils ont défini des styles architecturaux typiques. Ainsi la forme et les proportions d'une avancée de toit, caractéristique des constructions d'une région climatique, est directement liée à la course du soleil et à la puissance des vents dominants. Cette sélection des meilleures solutions bioclimatiques s'est faite au cours du temps, génération après génération de constructeurs. Quand on trouvait une nouvelle solution, encore mieux adaptée au climat local et aux modes constructifs en vigueur, on l'expérimentait, on la testait encore et encore... Son emploi ne se généralisait que lorsqu'on était certain de sa durabilité et de l'amélioration qu'elle apportait au confort du logement. Il en fut ainsi, par exemple, pour les génoises".  
Lorsque le passé n'éclaire plus l'avenir, le présent marche dans les ténèbres

Alexis de Tocqueville

### 5.1. Introduction

Les règles actuelles de conception des bâtiments sont essentiellement basées sur la minimisation des déperditions thermiques. Pour l'enveloppe du bâtiment cela se traduit par une prédominance de son isolation thermique. Certaines technologies bioclimatiques, et surtout solaires, existent déjà mais leur utilisation n'est pas du tout généralisée à cause d'un manque de repère sur leurs performances.

Pour que la démarche bioclimatique puisse être considérée, il est nécessaire de pouvoir évaluer à la fois la "qualité énergétique" de l'environnement et l'aptitude des bâtiments à exploiter cet environnement [1].

Notre travail se consacre à l'étude de quelques stratégies d'économie d'énergie dans le secteur du bâtiment. On s'intéresse à toutes les zones climatiques de l'Algérie.

Au sens large, consiste d'une part à optimiser l'architecture de façon à exercer un contrôle passif de l'environnement intérieur et d'autre part, montrer les limites de sévérité climatique du lieu afin de recourir à des procédés techniques actifs de production du confort.

## **5.2. Solutions bioclimatiques adoptées dans le cas d'une rénovation**

La rénovation éco-énergétique dans le bâtiment contribue à améliorer la qualité de la construction et à réduire sa consommation et ses dépenses en matière d'énergie. Les économies d'énergie peuvent être réalisées de la meilleure façon et de la manière la plus rentable lorsque le travail est effectué en même temps que la rénovation générale du bâtiment. Il peut par exemple être combiné avec le remplacement du toit ou des fenêtres ou la rénovation des murs ou des planchers extérieurs. Les économies d'énergie doivent donc être considérées conjointement avec un besoin continu de travaux de rénovation pour préserver la valeur des bâtiments. Toute opération de rénovation est une occasion privilégiée pour traiter l'ensemble des critères de confort, de qualité, de sécurité, d'énergie, etc. L'enjeu des travaux de réhabilitation va naturellement au-delà du seul aspect énergétique. La mise en œuvre des solutions techniques doit être considérée non seulement du point de vue de la performance énergétique mais également de la qualité sanitaire du bâti et de sa durabilité en portant une attention particulière au confort et à la santé des occupants. Pour cela, il est important de considérer toute action de rénovation dans sa globalité avec une approche multicritère.

En améliorant la performance thermique des parois, on réduit les déperditions, et par conséquent les dépenses de chauffage, et on augmente le confort. Il convient donc de choisir la technique la plus adaptée en portant une attention permanente à sa mise en œuvre et aux impacts (répercussions) que celle-ci aura sur le confort thermique hiver comme été, sur le confort acoustique, la sécurité incendie ainsi que la qualité de l'air intérieure et l'équilibre

hygrothermique du bâti. Le tableau 5.1 donne un récapitulatif des stratégies et des solutions bioclimatiques qui peuvent être intégrées dans le cadre d'une rénovation [2,3]. Ces améliorations énergétiques seront en fonction des spécificités du bâtiment existant, elles concernent notamment l'isolation des parois opaques et vitrées, l'amélioration de la ventilation et l'amélioration des systèmes de chauffage/refroidissement. En effet, on peut classer ces solutions de rénovation en différents niveaux (rénovation légère, moyenne et complète).

Solutions bioclimatiques	Définition	Degrés de rénovation
Surface vitrée	Les surfaces vitrées présentent les parties les plus sensibles aux changements climatiques extérieurs. Elles contribuent à une grande partie de déperditions thermiques à travers l'enveloppe du bâtiment. Or, avec l'utilisation des vitrages doubles et triples, le cadre est devenu la partie faible dans une fenêtre. Le cadre doit avoir une résistance plus proche de celle du vitrage et il doit être plus étanche pour limiter les infiltrations d'air.	1
Isolation thermique	Pour réduire le transfert de chaleur à travers l'enveloppe, son coefficient de conduction doit être réduit. L'isolation est la manière la plus simple pour atteindre cet objectif. Elle est utile tout au long de l'année. L'isolation par l'extérieur est une solution pour réduire les ponts thermiques.	1, 2 ou 3
L'inertie thermique	L'inertie d'un bâtiment est une fonction directe de sa capacité thermique, donc du produit de la masse de tous ses composants par leur chaleur spécifique massique. L'inertie thermique est toujours nécessaire pour améliorer le confort, en hiver comme en été, quel que soit le type et le mode d'utilisation des bâtiments. Pour assurer le confort d'été, l'inertie thermique doit être obligatoirement associée à des dispositifs de refroidissement des structures qui permettront d'éliminer, pendant la nuit, l'énergie emmagasinée pendant la journée. C'est le critère le plus difficile à respecter. Dans les bâtiments à occupation continue, l'inertie thermique est aussi une source d'économie d'énergie en hiver parce qu'elle permet une gestion optimum des apports de chaleur quotidiens.	2
Ventilation naturelle	La forte isolation thermique et l'étanchéité à l'air de son enveloppe visent à réduire les échanges thermiques avec l'extérieur, cependant le renouvellement de l'air est nécessaire notamment pour maintenir la bonne qualité de l'air intérieur.	1,2 et 3

Les protections solaires	Facilement intégrable. Solution qui correspond a une problématique d'été.	1
Le puits canadien	Dans les bâtiments possédant une cave, si tant est qu'ils ne soient pas dans une zone où on note la présence de radon, il est possible de tirer partie de la température de cette cave en hiver et en été. Pour les autres cas, il faut qu'une tranchée puisse être creusée en profondeur, à l'extérieur du bâtiment.	2 ou 3
La végétation	La végétation autour d'un bâtiment crée un microclimat très souhaitable dans les régions sèches (la végétation transpire de l'eau qui peut provoquer un effet de rafraîchissement passif par évaporation). De plus, la végétation et les arbres à feuilles caduques ombrageront la façade de la maison en été et laisseront passer les rayons du soleil en hiver.	1, 2 ou 3
L'éclairage naturel	Pour les combles, l'installation de fenêtre en toiture est généralement possible. Une solution pour les bâtiments dont les pièces ne peuvent être décroissonnées est l'installation d'un puits de lumière.	1, 2 ou 3

**Tableau 5.1.** Les dispositifs climatiques et le degré de rénovation

### **5.3. Calcul des besoins énergétiques**

La méthode a pour but de dresser un bilan énergétique complet, cette situation nous a obligé d'invoquer :

- Le mode de vie et le scénario d'occupation des habitants
- La température intérieure du confort
- Les apports solaires
- La consommation d'eau chaude sanitaire calculée sur la base d'un taux d'occupation standard
- Les apports internes de chaleur liés aux occupants et aux équipements électriques spécifiques (non destinés au chauffage)
- Les données climatiques

L'efficacité énergétique d'un bâtiment alors est influencée par divers facteurs : orientation, forme, qualité de l'isolation thermique, choix des fenêtres, ...

Les besoins en chauffage et/ou en refroidissement calculés pour un bâtiment, exprimés en wattheures (Wh) sont donnés en général par les équations ci-dessous [4-6]:

$$Q_{Tot} = \left| Q_{Enveloppe} \pm (Q_{Occup} + Q_{Elec}) \right| + Q_{ECS} + Q_{Cons\_Elc} \pm Q_{Solaire} \quad (5.1)$$

En période de chauffage, l'équation 5.1 peut être assimilée par l'équation suivante :

$$Q_{Tot} = Q_{Enveloppe} - (Q_{Occup} + Q_{Elec}) + Q_{ECS} + Q_{Cons\_Elc} - Q_{Solaire} \quad (5.2)$$

Pour le refroidissement, l'équation générale se simplifie comme suit:

$$Q_{Tot} = Q_{Enveloppe} + Q_{Occup} + Q_{Elec} + Q_{ECS} + Q_{Cons\_Elc} + Q_{Solaire} \quad (5.3)$$

En intersaisons, si la chaleur diffusée par les apports internes, comme la lumière, les occupants et leurs activités, est supérieure par rapport à la consommation d'énergie due à l'enveloppe, les besoins énergétiques seront calculés comme suit:

$$Q_{Tot} = \left| Q_{Enveloppe} - (Q_{Occup} + Q_{Elec}) \right| + Q_{ECS} + Q_{Cons\_Elc} \pm Q_{Solaire} \quad (5.4)$$

Toujours en intersaisons et si la chaleur diffusée cette fois-ci est inférieure à la consommation d'énergie due à l'enveloppe, l'équation générale se simplifie comme suit :

$$Q_{Tot} = Q_{Enveloppe} - (Q_{Occup} + Q_{Elec}) + Q_{ECS} + Q_{Cons\_Elc} \pm Q_{Solaire} \quad (5.5)$$

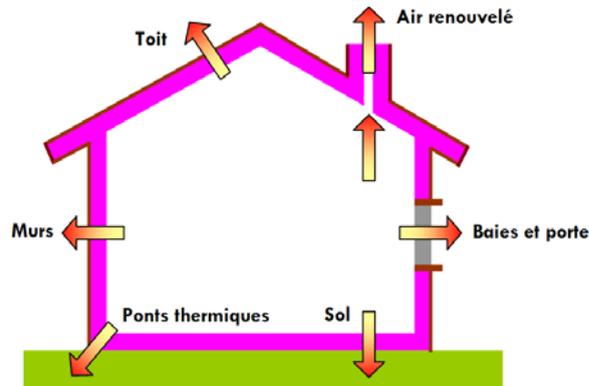
### 5.3.1. Besoins énergétiques dus à l'enveloppe

Les équations qui permettent de calculer les besoins énergétiques dus à l'enveloppe ont été déjà détaillées dans le chapitre 4. Le seul changement a été apporté aux niveaux des équations qui déterminent les besoins énergétiques dues à la ventilation. Nous rappelons que l'équation générale est donnée par l'expression suivante [4-6]:

$$Q_{\text{Enveloppe}} = 24 DP_{\text{Enveloppe}} Dj \quad (5.6)$$

$DP_{\text{Enveloppe}}$  : Somme des déperditions thermiques dues aux murs, fenêtres, portes, plafonds, ponts thermiques, sol et à la ventilation, (W/K).

$Dj$ : Nombre de degrés-jours de chauffage et de refroidissement.



**Figure 5.1.** Sources principale de déperditions

$$Q_{\text{Enveloppe}} = DP_{\text{plafonds}} + DP_{\text{murs}} + DP_{\text{sols}} + DP_{\text{portes}} + DP_{\text{fenêtres}} + DP_{\text{ponts}} + DP_{\text{ventil}} \quad (5.7)$$

Pour calculer les déperditions thermiques dues à la ventilation, nous devons se baser sur les données suivantes:

- Menuiserie : avec ou sans joint
- Surface adjacente avec l'extérieur à l'exception du plancher bas
- Surface habitable
- Type de ventilation

Le remplacement d'air vicié par l'air neuf dans un bâtiment est une condition essentielle pour assurer un niveau convenable de confort aux occupants. Or, ce renouvellement d'air, selon l'écart de température, engendre une déperdition d'énergie en période de chauffe, ou des apports calorifiques en période de refroidissement. Le défaut d'étanchéité de l'enveloppe du bâtiment (perméabilité) joue aussi un grand rôle dans les déperditions thermiques. Ces défauts d'étanchéité sont multiples :

- Joints des ouvrants de mauvaise qualité
- Linéiques des ouvrants non rendus étanches par application de mousse expansive ou tout autre procédé.
- Appuis de fenêtres scellés sur les côtés mais non par le dessous
- Murs extérieurs en maçonnerie courante, briques ou parpaings, maçonnés avec trop de jeu...etc.

$$D P_{\text{Ventil}} = 0.34 q v_{\text{en}} \quad (5.8)$$

$DP_{\text{Ventil}}$ : déperditions thermiques dues au système de ventilation par degré de différence en température entre l'intérieur et l'extérieur (W/K)

$q v_{\text{en}}$  : est le débit d'air équivalent transitant dans le logement

0.34 : est la capacité thermique volumique de l'air en Wh/m<sup>3</sup>K

$$q v_{\text{en}} = q v_{\text{Fen}_H} + q v_{\text{Fen}_S} + q v_{\text{Comb}} + q v_{\text{vmc}} + q v_{\text{perm}} + q v_{\text{condext}} \quad (5.9)$$

Si un ou plusieurs des débits ne sont pas utilisés, ils ont pour valeur 0

$q v_{\text{Fen}_H}$  : est le débit d'air d'aération quand les fenêtres sont utilisées comme système de ventilation d'hygiène.

$$q v_{\text{Fen}_H} = 1,8 D_{\text{Hyg}} \quad (5.10)$$

$D_{\text{Hyg}}$  est le débit d'hygiène

$q v_{\text{Fen}_S}$  : est le débit supplémentaire dans le cas où l'ouverture des fenêtres vient en complément du système spécifique (aspect comportemental de l'occupant)

$$q v_{\text{Fen}_S} = 1800 (0.01 S_p) F_{\text{ouv}} v_{\text{fen}} \quad (5.11)$$

$S_p$  est la surface de la pièce

$$F_{\text{ouv}} = 0.6 \text{ Max} ( 0, (T_{\text{ext}}/25)+0.2 ) \quad (5.12)$$

$$v_{\text{fen}} = 0.5 ( 0.026 + 0.00525 \Delta T ) \quad (5.13)$$

$q v_{\text{Comb}}$  : est le débit supplémentaire extrait lié au fonctionnement des appareils à combustion quand ils se trouvent dans les pièces chauffées.

$$q_{V_{comb}} = \begin{cases} 0.002 P_{Chauf} & \text{pour les VMC gaz} \\ 0.003 P_{Chauf} & \text{pour les autres} \end{cases} \quad (5.14)$$

$P_{Chauf}$  : est la puissance fournie par le système de chauffage

$$P_{Chauf} = 1.2 (U_T + U_V) \Delta T \quad (5.15)$$

$U_T$  : est le coefficient de déperdition par transmission. Afin de simplifier, il est possible d'utiliser la formule utilisant le coefficient  $U_{bât}$

Ce coefficient est par définition la déperdition théorique d'un bâtiment par transmission à travers les murs, il est exprimé en (W/m<sup>2</sup> K). Cette méthode de calcul est la plus utilisée, mais sa valeur rationnelle est de 0 à 2, sachant que 0 est une excellente isolation et 2 une isolation inexistante [7].

- Construction non isolée et fenêtres simples vitrage :  $U_T = 1.80$
- Construction entre 1974 et 1982 :  $U_T = 1.40$
- Construction entre 1983 et 1989 :  $U_T = 1.15$
- Construction entre 1990 et 2000 :  $U_T = 0.95$
- Construction norme RT 2000 entre 2001 et 2006 :  $U_T = 0.80$
- Construction norme RT 2005 entre 2007 et 2012 :  $U_T = 0.75$
- Construction nouvelle avec très bonne isolation :  $U_T = 0.40$
- Construction dernière génération avec excellente isolation :  $U_T = 0.30$

$H_V$  : est le coefficient de déperdition par renouvellement d'air. Il est possible d'utiliser les débits d'hygiène majorés de 30 % pour tenir compte des autres déperditions.

$\Delta T$  : est la différence entre la température de la pièce et celle de base (°C)

$q_{V_{vmc}}$  : est le débit d'air extrait par la ventilation mécanique. Le débit  $q_{V_{vmc}}$  est corrigé par les coefficients  $C_d$  et  $C_{fr}$ .

$$q_{V_{vmc}} = D_{Hyg} C_d C_{fr} \quad (5.16)$$

Le coefficient de dépassement  $C_d$  est un facteur multiplicatif des débits d'hygiène visant à prendre en compte les contraintes de dimensionnement de l'installation

de ventilation et la dispersion des caractéristiques de composants.  $C_d = 1.15$  dans le cas où le matériel est certifié, 1.30 dans les autres cas.

Le coefficient de fuite du réseau  $C_{fr}$  est une valeur par défaut, 0.833 en basse pression ( $< 20$  Pa) ou 2.5 dans les autres cas.

$q_{V_{perm}}$ : est le débit de fuite de l'enveloppe.

$$q_{V_{perm}} = A_T C_{perm} \quad (5.17)$$

La perméabilité de l'enveloppe est représentée par le débit de fuite (en  $m^3/h$ ) sous une dépression de 4 pascals par  $m^2$  de surface de l'enveloppe. La surface de l'enveloppe considérée est la surface des parois déperditives  $A_T$ .

$A_T$  : est la surface intérieure totale des parois qui séparent le volume chauffé de l'extérieur, du sol et des locaux non chauffés, en  $m^2$ , dont on exclut les planchers bas. La valeur par défaut de la perméabilité de l'enveloppe (en  $m^3/h m^2$  sous 4 Pa) est calculée en multipliant la surface d'enveloppe ( $A_T$ ) par la valeur de perméabilité donnée dans le tableau suivant:

Usage	$C_{perm}$
Logements individuels	1.3
Logements collectifs	1.7
Autres usages	3

**Tableau 5.2.** Valeur de la perméabilité

$q_{V_{condext}}$  : est le débit d'air extrait par les conduits à tirage naturel. Pour connaître le débit, il faut connaître les différentes pertes de charge, perte de charge linéique du conduit  $\Delta P_{cond}$ , perte de charge singulière des coudes  $\Delta P_{coude}$ , perte de charge singulière de la bouche  $\Delta P_{bouche}$ , ainsi que la force motrice due à la différence de densité entre l'air chaud du logement et l'air extérieur  $\Delta P_{mot}$ .

$$M_{Air\_froid} = 1.293 \cdot 273.15 / (273.15 + T_{ext}) \quad (5.18)$$

$$M_{Air\_chaud} = 1.293 \cdot 273.15 / (273.15 + T_{int}) \quad (5.19)$$

$M$  : la masse d'air (kg)

$T_{ext}$  et  $T_{int}$  étant respectivement la température extérieure et intérieure (en °C)

Exemple [8]:  $T_{int} = 20$  °C et  $T_{ext} = 0$  °C

Soit,

$$M_{Air\_froid} = 1.293 \times 273.15 / (273.15 + 0) = 1.293 \text{ kg/m}^3$$

$$M_{Air\_chaud} = 1.293 \times 273.15 / (273.15 + 20) = 1.204786 \text{ kg/m}^3$$

La dépression motrice est donc égale à

$$\Delta P_{mot} = (1.293 - 1.204786) h g,$$

$h$  : est la hauteur en m du conduit de ventilation de l'axe de la bouche au haut du conduit.

$g$  : l'accélération de la pesanteur égale à  $9.81 \text{ m/s}^2$ .

Ceci nous donne un coefficient de  $(1.293 - 1.204786) \times 9.81 = 0.865 \text{ Pa/m}$ .

Comme les valeurs par défaut sont  $T_{int} = 20$  °C et  $T_{ext} = 0$  °C, il suffit de multiplier 0.865 par la hauteur du conduit pour obtenir la dépression motrice

$\Delta P_{mot}$ .

Si le conduit est de forme rectangulaire ou carré, son diamètre équivalent  $D_{equiv}$  doit être utilisé

$$D_{equiv} = 4 A / P, \text{ où } A \text{ est la section en m}^2 \text{ du conduit et } P \text{ le périmètre en m}$$

Pour obtenir les différentes pertes de charge, il a fallu utiliser les formules suivantes :

$$\Delta P_{cond} = 1.5 \cdot 0.05 (L / D_{equiv}) (M_{Air\_chaud} / 2) v^2,$$

$v$  : est la vitesse en m/s

$L$  : la longueur du conduit

$$\Delta P_{coude} = 1.15 (M_{Air\_chaud} / 2) v^2 N_{coude},$$

$N_{coude}$  : est le nombre de coudes

$$\Delta P_{bouche} = 2.5 (M_{Air\_chaud} / 2) v^2$$

Pour connaître le débit en  $\text{m}^3/\text{h}$ , il est nécessaire de connaître la vitesse en m/s.

Comme les pertes de charge sont fonction de la vitesse de l'air dans le conduit, une vitesse limite ne peut être dépassée. Ce qui veut dire que la perte de charge

totale ne pourra excéder la dépression = à  $\Delta P_{\text{mot}}$ . Il va donc falloir procéder par itération pour trouver la vitesse du fluide sans pour autant dépasser la dépression motrice. Pour cet exercice, un outil informatique est conseillé. Une fois la vitesse connue, il suffit d'utiliser la formule suivante pour connaître le débit en  $\text{m}^3/\text{h}$ .

$$\text{Débit} = v \cdot S \cdot 3600$$

**Exemple [8]:**  $h = 7 \text{ m}$ ,  $L = 8 \text{ m}$ ,  $A = 0.2 \times 0.2 = 0.04 \text{ m}^2$ ,  $N_{\text{coude}} = 2$

$$P_{\text{mot}} = 0.865 \times 7 = 6.05 \text{ Pa}$$

$$P = 0.2 \times 4 = 0.8 \text{ m}$$

$$D_{\text{équiv}} = 4 \times 0.04 / 0.8 = 0.2 \text{ m}$$

À l'aide d'un tableur, la vitesse obtenue par itérations successives pour une perte de charge totale n'excédant pas 6.05 Pa (6.0577 Pa) est de 1.135 m/s, ce qui donne comme pertes de charge pour chaque poste :

$$\Delta P_{\text{cond}} = 1.5 \times 0.05 \times (L / 0.2) \times (1.204786 / 2) \times v^2 = 2.33$$

$$\Delta P_{\text{coude}} = 1.15 \times (1.204786 / 2) \times v^2 \times 2 = 1.78$$

$$\Delta P_{\text{bouche}} = 2.5 \times (1.204786 / 2) \times v^2 = 1.94$$

Ceci donne une perte de charge totale de  $2.33 + 1.78 + 1.94 = 6.05 \text{ Pa}$  qui est égale à la dépression motrice.

Le débit en  $\text{m}^3/\text{h}$  est donc de  $q_{V_{\text{condext}}} = 1.135 \times 0.04 \times 3600 = 163.44 \text{ m}^3/\text{h}$

### 5.3.2. Besoins en eau chaude sanitaire

La littérature a montré que les besoins raisonnables se situaient entre 25 et 60 litres d'eau chaude à 50 °C par jour et par personne [4,6]. Le calcul des besoins en eau chaude sanitaire doit être fait par jour puis on multiplie par le nombre de jours du mois considéré. Si le volume est différent les jours de la semaine et le Week-end, une moyenne journalière peut être faite puis on multiplie par le nombre de jours du mois considéré. La formule qui donne

l'énergie nécessaire à la production de l'eau chaude sanitaire est donnée par [4,6]:

$$Q_{ECS} = p \cdot 1.1628 \cdot V_{ECS} \cdot (T_{ECS} - T_{ef}) \quad (5.20)$$

$Q_{ECS}$  : est l'énergie nécessaire à la production de l'eau chaude sanitaire pour la journée, en Wh.

$p$  : est la masse volumique de l'eau en fonction de sa température (en Kg/litre), elle peut être prise égale à 1 Kg/litre.

$V_{ECS}$  : est le volume d'eau (m<sup>3</sup>),

$$V_{ECS} = 50 \cdot N_{Pers} \quad (5.21)$$

$N_{Pers}$  : est le nombre de personnes occupant le logement

$T_{ECS}$  : est la température de l'eau chaude au point de soutirage, en °C.

$T_{ef}$  : est la température moyenne de l'eau froide du mois considéré entrant dans le ballon ou le serpentin de production d'eau chaude sanitaire (production instantanée), en °C.

### 5.3.3. Apports internes dus aux occupants

Le tableau 5.3 donne une estimation sur la diffusion de chaleur en fonction de l'activité pratiquée par l'individu. Les apports internes dus aux occupants sont donnés par l'équation 5.22 [4,6]:

$$Q_{Occup} = C_p \cdot N_{Pers} \cdot D_{pres/jour} \cdot N_{Jch} \quad (5.22)$$

Niveau d'activité	Exemples d'activité	Diffusion de chaleur par personne (sensible et latente)
1	Activité statique assise (lire et écrire par exemple)	120 W
2	Travaux simples assis ou debout, travail en laboratoire, machine à écrire	150 W
3	Activités corporelles légères	190 W
4	Activités corporelles moyennes à difficiles	Plus de 200 W

**Tableau 5.3** : Diffusion de chaleur par personne [4,6]

$C_p$  : la chaleur dégagée par occupant (W/occupant)

$N_{Pers}$  : le nombre d'occupant

$D_{pres/jour}$  : la durée de présence par jour (h/jour)

$N_{Jch}$  : le nombre de jours chauffés (jours/an)

#### 5.3.4. Apports internes dus à l'éclairage et aux équipements électriques

Les machines électriques, en raison de leur fonctionnement, émettent une certaine quantité de chaleur dans l'ambiance. Pour les appareils électriques, il n'existe pas une méthode de calcul universelle qui puisse être appliquée pour calculer les apports, ni la répartition sensible / latente de cette chaleur. Dans certaines références, il a été proposé quelques valeurs de gains en chaleur pour différents appareils électroménagers.

Type d'équipement	Durée (heures) et modes de fonctionnement (Watts)				Energie (kWh)
	Mode 1	Nombre d'heures	Mode 2	Nombre d'heures	
2 (LCD TV + Démo intégrée)	20	19	78	5	1.540
Réfrigérateur	12	22	145	2	0.554
Éclairage	200	6			1.200
2 ordinateurs à écran plat	32	2	186	4	1.616
Autres					1.500
Energie totale par jour					6.410

**Tableau 5.4.** Diffusion de chaleur par l'éclairage et équipements électriques (cas de notre étude) [4, 6, 9]

#### 5.3.5. Charges énergétiques dues aux appareils électriques et à l'éclairage

Le calcul de la consommation électrique se fera en fonction des données suivantes:

- La puissance de l'appareil électrique exprimée en watts

- Le nombre d'heures par jour pendant lesquelles l'appareil fonctionne
- Le nombre de jours par an pendant lesquels l'appareil fonctionne.

Le calcul se fera donc en effectuant le produit entre le nombre d'heures d'utilisation, le nombre de jours d'utilisation et la puissance de l'appareil en watts. Le résultant sera divisé par 1000 pour convertir le nombre de watts en kilowatts.

$$Q_{\text{Equi\_elec}} = \text{Nb}_{\text{heures}} \text{ Nb}_{\text{jours}} \frac{\text{Equi\_elec}}{1000} \quad (5.23)$$

Type d'équipement	Puissance (W)		Durée de l'utilisation par jour	Consommation journalière moyenne (Wh)
	Valeurs de fonctionnement	Valeurs sélectionnées		
2 LCD TV en service avec démo intégrée	90 to 250	140	5 h	1514.00
mode veille	3	/	19 h	
2 Réfrigérateurs Capacité de 250L	150 to 200	/	Opération continue	1102.00
Éclairage : 16 lampes à faible coût	15 to 25	20	6 h (Chambres) 3 h (Cuisine) 1 h (Salle de bains) 1 h (Chambre à coucher)	880.00
2 ordinateurs à écran plat	70 to 80	75	4 h	612.00
en service mode veille	3	/	2 h	
2 Chargeur de téléphone portable	5	/	1 h	1.00
2 fers à repasser	750 to 1100	925	15 min	462.50
2 aspirateur	650 to 800	720	12 min	288.00
2 Alarme radio	3 to 6 W	4.5	Opération continue	216.00
2 Rasoir électrique	8 to 12 W	10	3 min	1.00
2 séchoir à cheveux	300 to 600 W	450	5 min	75.00
Total par jour (Wh)				5151.50/ jour

**Tableau 5.5.** Consommation moyenne des appareils électriques par jour (cas de notre étude) [4, 6, 9]

### 5.3.6. Les apports solaires

Les apports solaires dépendent de l'ensoleillement normalement présent sur le site concerné et des surfaces réceptrices équivalentes sur les différentes orientations. Pour une période de calcul donnée, les apports solaires se calculent comme suit :

$$Q_{\text{Solaire}} = \sum_j I_{Sj} \sum_n A_{Snj} \quad (5.24)$$

La première somme s'effectue sur toutes les orientations  $j$ , (Horizontal, Nord, Sud, Est, Ouest, Nord-Est, Nord-Ouest, Sud-Est, Sud-Ouest ...etc.).

La seconde somme s'effectue sur toutes les surfaces  $n$  d'orientation  $j$  qui captent le rayonnement solaire

$I_{Sj}$  : est l'irradiation solaire sur une surface unitaire ayant l'orientation  $j$

$A_{Snj}$  : est l'aire réceptrice équivalente de la surface ayant l'orientation  $j$ . Elle est calculée comme suit:

$$A_{Snj} = A F_{\text{Omb}} F_{\text{Red}} g \quad (5.25)$$

$A$  : est l'aire de la baie ( $m^2$ )

$F_{\text{Red}}$  : est le facteur de réduction pour les encadrements des vitrages, égal au rapport de l'aire de la surface transparente à l'aire totale de la menuiserie vitrée;

$F_{\text{Omb}}$  : est le facteur d'ombre, il est défini par l'utilisateur pour des raisons simplificatrices, et peut être calculé par :

$$F_{\text{Omb}} = F_{\text{Omb}_R} F_{\text{Omb}_S} \quad (5.26)$$

$F_{\text{Omb}_R}$  : est le facteur d'ombre des rideaux;

$F_{\text{Omb}_S}$  : est le facteur d'ombre de la surface qui peut être calculé par :

$$F_{\text{Omb}_S} = F_{\text{Cor}_h} F_{\text{Cor}_\text{Sur}} F_{\text{Cor}_\text{Ecr}} \quad (5.27)$$

$F_{\text{Cor}_h}$  : est le facteur de correction pour l'horizon

$F_{\text{Cor}_\text{Sur}}$  : est le facteur de correction pour les surplombs

$F_{Cor\_Ecr}$  : est le facteur de correction pour les écrans latéraux

$g$  : est le facteur solaire de la baie

Le facteur solaire utilisé dans cette formule est en principe la moyenne dans le temps du rapport de l'énergie traversant l'élément exposé à l'énergie incidente sur celui-ci, en l'absence d'ombrage. Certaines valeurs figurent dans le tableau 5.6. Ces valeurs correspondent à l'incidence normale, avec une surface propre.

Type de vitrage	$g$
Vitrage simple	0.85
Double vitrage clair	0.75

**Tableau 5.6.** Facteurs solaires pour les deux types de vitrages les plus courants

#### 5.4. Localisation géographique et données climatiques

Cette partie va se concentrer sur l'évaluation de l'efficacité énergétique de ce bâtiment familial lorsqu'il est soumis à toutes les zones climatiques de l'Algérie. Notre pays dispose d'une grande variété de zones climatiques. Pour ce faire, on se base sur la carte mondiale de Köppen-Geiger qui est une référence et elle est continuellement à jour, elle donne une classification des climats fondées sur les précipitations et les températures. Contrairement au reste du pays qui se caractérise par un climat désertique, la partie nord est sous l'influence d'un climat méditerranéen. Quoique, il existe des climats de transition entre ces deux types principaux de climat, en particulier le climat semi-aride provoquant une grave sécheresse dans certaines périodes, même en dehors de la saison estivale. L'Algérie est aussi un pays de la zone subtropicale où le climat est chaud et sec. Pour couvrir tous les cas possibles, le choix des zones éligibles a été fixé sur sept zones climatiques (figure 5.2) réparties sur l'ensemble du territoire algérien. Les coordonnées géographiques des villes sélectionnées sont indiquées dans le tableau 5.7.

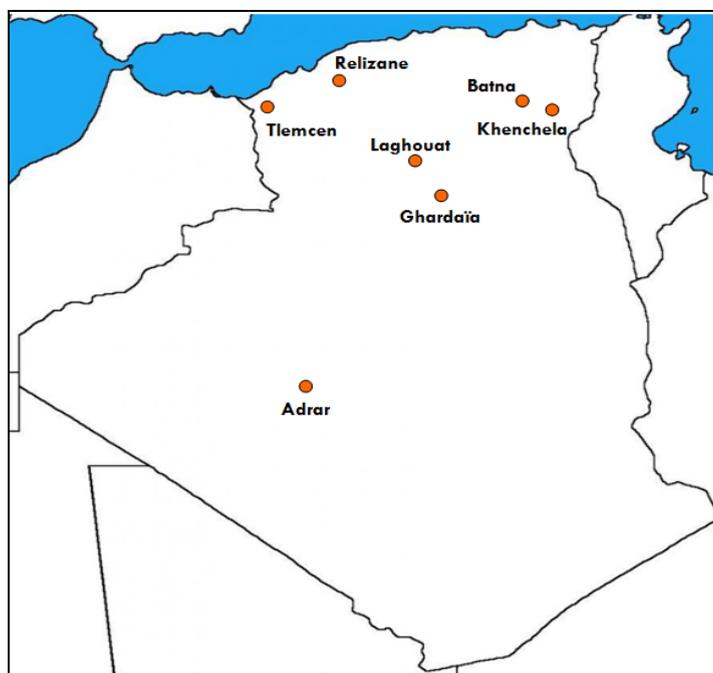


Figure 5.2. Localisation géographique des sites climatiques

Sites	Classification climatique	Latitude	Altitude	Longitude
Tlemcen	Climat méditerranéen avec l'été chaud	34° 53' 24" Nord	715 m	1° 19' 12" Ouest
Batna	Climat froid semi-aride	35° 33' 0" Nord	968 m	6° 10' 12" Est
Ghardaïa	Climat désertique sec et chaud	32° 28' 60" Nord	489 m	3° 40' 60" Est
Adrar		27° 52' 0" Nord	279 m	0° 16' 60" Ouest
Laghouat	Climat désertique sec et froid	33° 48' 23" Nord	769 m	2° 52' 56" Est
Khenchela	Climat tempéré chaud	35° 0' 0" Nord	1380 m	7° 0' 0" Est
Relizane	Climat chaud semi-aride	35° 43' 60" Nord	150 m	0° 33' 0" Est

Tableau 5.7. Coordonnées géographiques et classification climatique de Köppen

Le nord de l'Algérie est une zone tempérée; son climat est similaire à celui des autres pays méditerranéens. Les hauts plateaux sont un relief bordant l'Atlas tellien au nord et l'Atlas saharien au sud, le climat est dans certaines périodes similaires au climat Saharien. Sous un climat Saharien, les températures peuvent franchir les 44 °C. La durée d'ensoleillement, la température moyenne et les précipitations au cours de l'année sont accessibles en cliquant sur le lieu en

question en consultant le site indiqué par la référence [10]. Les courbes des températures mensuelles des sites d'étude, situés dans sept zones climatiques (toutes les zones possibles) sont données par la figure 5.3.

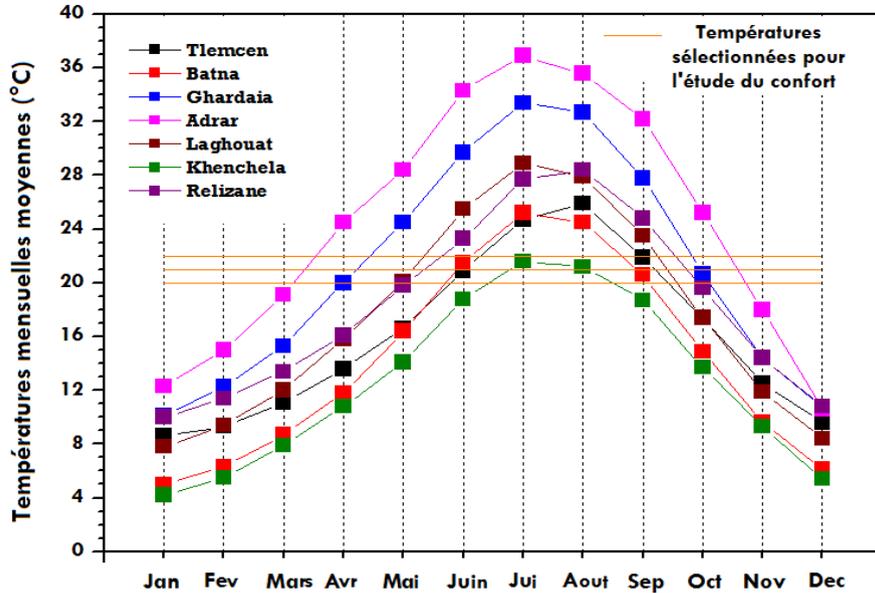


Figure 5.3. Températures moyennes mensuelles pour plusieurs régions climatiques [11]

Le climat de Tlemcen est chaud et tempéré. En hiver, les pluies sont bien plus importantes qu'en été. La température moyenne annuelle est de 16.0 °C; la moyenne des précipitations est de 484 mm. Batna est influencée par le climat de steppe. Batna affiche 14.2 °C de température en moyenne sur toute l'année. Les précipitations annuelles moyennes sont de 329 mm. Ghardaïa est caractérisée par un climat désertique. Dans l'ensemble, il n'y a pratiquement pas de précipitations au cours de l'année. La température moyenne et les précipitations moyennes sont de 21.0 °C et 68 mm de pluie par an respectivement. De même pour Adrar, le climat est désertique. En général, il n'y a pas de pluie; la température annuelle moyenne est fixée à 24.3 °C, en moyenne tombe par année environ 16 mm de pluie. Laghouat est influencée par un climat aride. La température moyenne annuelle est de 17.4 °C. Chaque année, les précipitations moyennes sont d'environ 176 mm. Le climat de Khenchela est chaud et tempéré. En hiver, il y a beaucoup plus de précipitations qu'en été. Les moyennes

enregistrées des températures annuelles et des précipitations sont d'environ 14 °C et 446 mm respectivement. Enfin, le climat de Relizane est un climat de steppe. À tout moment de l'année, les précipitations sont faibles. La température moyenne enregistrée est de l'ordre de 18.3 °C, la pluviométrie moyenne est de 349 mm par an.

### **5.5. Résultats : Principales pistes pour améliorer l'efficacité énergétique**

L'amélioration de l'efficacité énergétique doit inclure des modifications de l'enveloppe thermique et l'efficacité des éléments consommateurs d'énergie. La charge électrique peut être alimentée par de l'électricité renouvelable (système photovoltaïque), mais les pertes thermiques (pertes majeures et dominantes) ne peuvent raisonnablement être réduites que par une couche efficace de matériau isolant. Ainsi, cette étude se consacre sur une isolation thermique adéquate et un scénario d'occupation raisonnable. Un diagnostic approfondi des charges de chauffage et de refroidissement a été effectué. Les quelques travaux de recherche qui existent dans la littérature ne traitent pas correctement le problème; la spécificité est directement liée à certaines conditions sévères. Outre, les informations précédemment indiquées sur la consommation moyenne d'énergie par jour pour les appareils électriques, la diffusion de la chaleur par éclairage et les équipements électriques, les autres caractéristiques principales du scénario retenu sont les suivantes :

- Le nombre de personnes dans ce logement est de 7.
- La durée de la présence est de 14 heures par jour.
- La chaleur rayonnée par personne est de 150 W.
- Les températures de confort proposées pour l'étude sont fixées à  $T_1 = 20$  °C,  $T_2 = 21$  °C,  $T_3 = 22$  °C.

Le calcul des besoins en eau chaude sanitaire doit être effectué par jour et en fonction du nombre total de jours du mois en question. La quantité d'énergie nécessaire pour la production d'eau chaude sanitaire est de 50 litres à 50 °C

par personne et par jour. Les besoins en électricité de l'ensemble du bâtiment, les besoins en eau chaude sanitaire et les gains internes dus aux occupants sont des caractéristiques communes à tout site climatique. Les valeurs sont répertoriées dans le tableau 5.8.

	$T_{cw}$	Besoins ESC (50°C) $Q_{ESC}$	Gains de chaleur internes		$Q_{Elic\_consom}$
			$Q_{occup}$	$Q_{Elic}$	
Janvier	04.0	580.35	455.70	198.71	159.70
Fevrier	05.5	507.10	411.60	179.48	144.24
Mars	07.5	536.20	455.70	198.71	159.70
Avril	10.5	482.27	441.00	192.30	154.54
Mai	14.0	454.19	455.70	198.71	159.70
Juin	16.0	415.12	441.00	192.30	154.54
Juillet	18.0	403.72	455.70	198.71	159.70
Aout	18.0	403.72	455.70	198.71	159.70
Septembre	16.5	409.01	441.00	192.30	154.54
Octobre	13.5	460.50	455.70	198.71	159.70
Novembre	09.0	500.58	441.00	192.30	154.54
Décembre	05.0	567.74	455.70	198.71	159.70

**Tableau 5.8.** Energies requises (kWh) dues au scénario d'occupation: Besoins en eau chaude sanitaire, consommation d'énergie électrique et énergie générée par les gains internes.

Nous procéderons ensuite à une comparaison en termes de consommation énergétique entre deux bâtiments résidentiels. L'un est significativement à forte consommation, tandis que le second est spécifié comme un bâtiment avec une consommation d'énergie plus faible. Dans ce cas, des couches supplémentaires d'un matériau isolant (0.04 W / mK, 10 kg / m<sup>3</sup>) sur les murs extérieurs (10 cm), le toit (10 cm) et le sol (5 cm) ont été ajoutées.

Les figures 5.4 à 5.6 fournissent des résultats significatifs pour la consommation globale, l'efficacité énergétique, les besoins en énergie de chauffage et de refroidissement pour les sept régions climatiques.

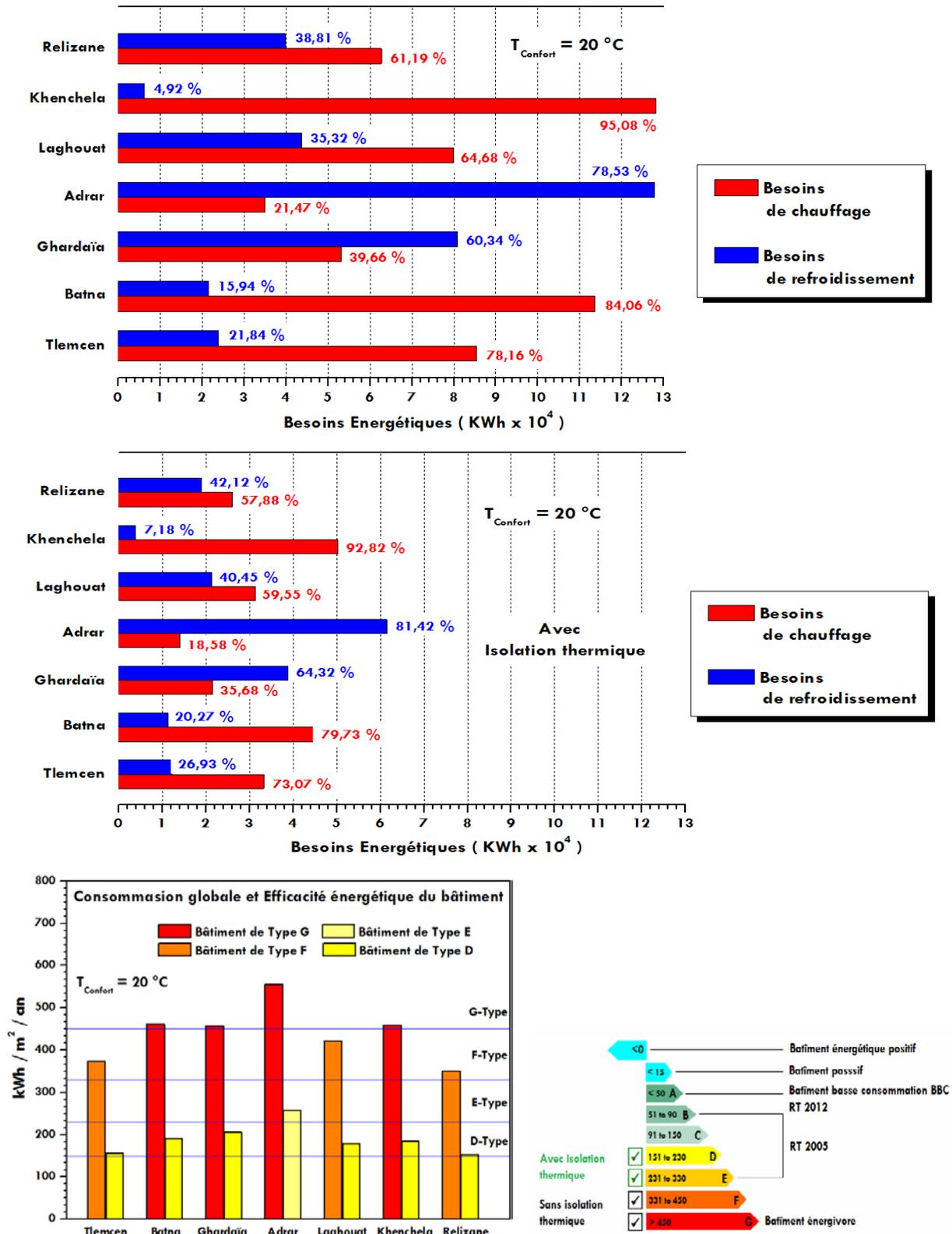


Figure 5.4. Consommation globale, efficacité énergétique et système d'étiquetage des bâtiments,  $T_{conf} = 20^{\circ}C$ .

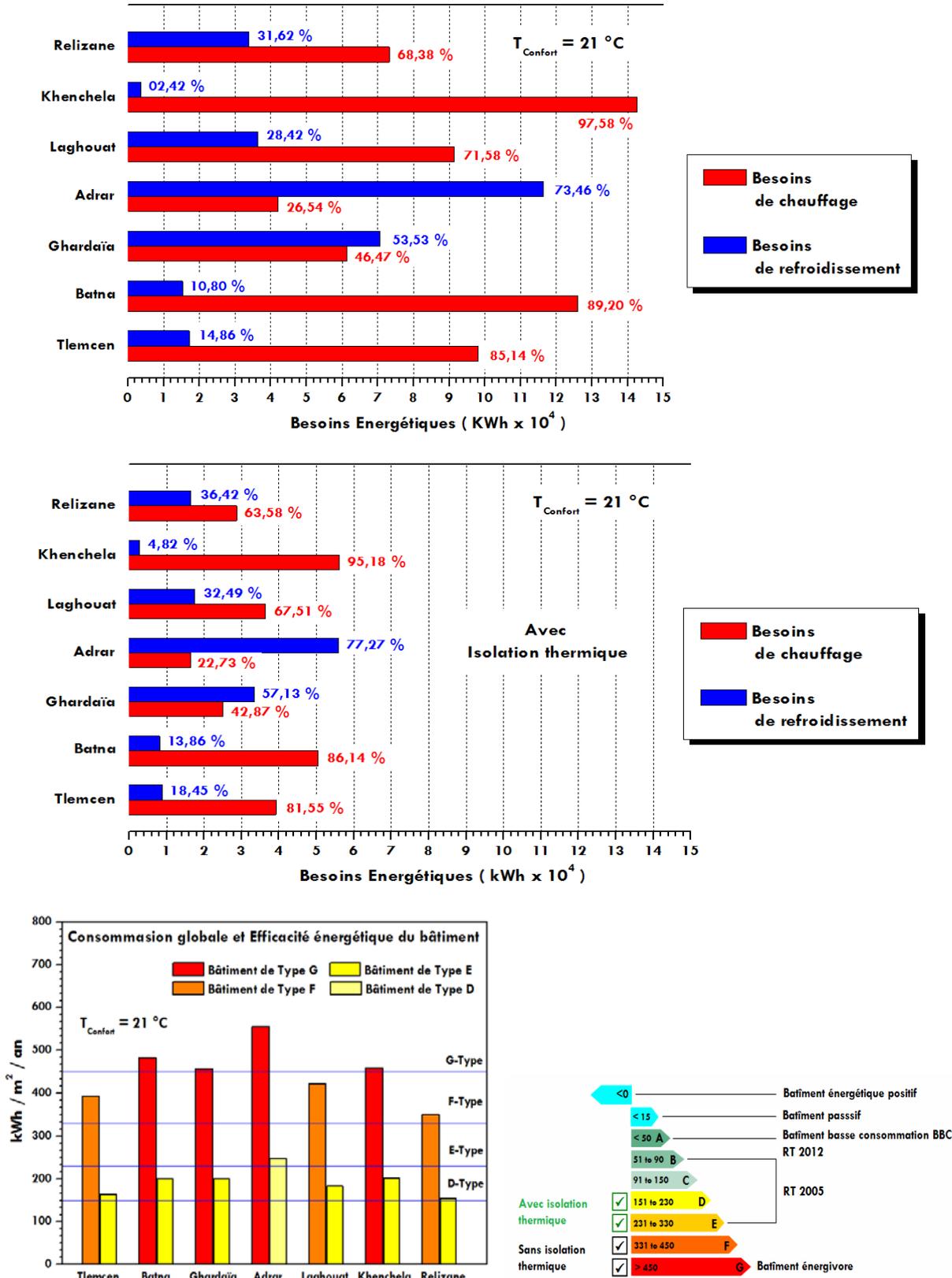


Figure 5.5. Consommation globale, efficacité énergétique et système d'étiquetage des bâtiments,  $T_{conf} = 21\text{ }^{\circ}\text{C}$

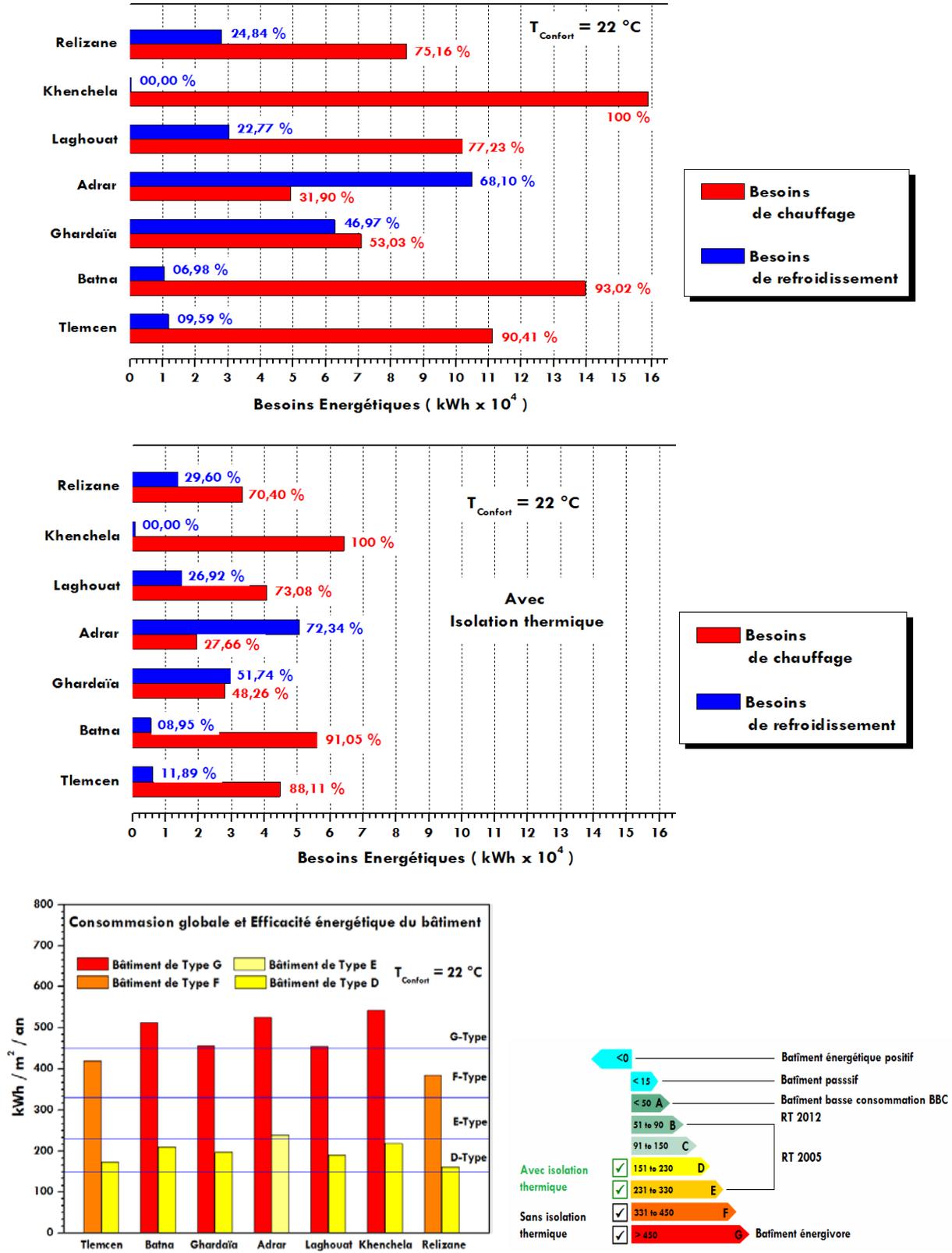


Figure 5.6. Consommation globale, efficacité énergétique et système d'étiquetage des bâtiments, T<sub>conf</sub> = 22 °C.

Selon les résultats affichés,

- Les besoins énergétiques totaux (chauffage et climatisation) varient d'une zone climatique à une autre.
- Ces besoins vont atteindre une valeur record dans la zone Adrar pour des températures fixes à 20 et 21 °C quelque soit le niveau d'isolation thermique.
- En balayant toutes les zones climatiques, les besoins énergétiques sont maximums pour la région de Khenchela, en absence d'isolation et pour une température annuelle fixée à 22 °C. Pour une meilleure isolation, la consommation d'énergie globale est maximale à Adrar.
- La différence entre les deux climats est radicale. Contrairement à la région d'Adrar, les besoins de chauffage dominant dans la région de Khenchela et peuvent atteindre des niveaux record. Les besoins de refroidissement se situent entre 68.10 et 78.53% pour une température de confort annuelle variant de 20 à 22 °C.
- En se situant dans le site de Relizane, ce type de construction sera soumis à des conditions climatiques plus favorables. Avec ou sans isolation thermique, l'utilisation de l'énergie consommée sera minimale et plus avantageuse par rapport à d'autres sites.
- Pour un bâtiment non isolé, cette construction peut devenir énergivore (type G) ou gourmande (type F) en énergie pour les régions climatiques caractérisées par un climat froid semi-aride (Batna, Djelfa, Tébessa, Bordj Bou Arreridj, M'Sila ...). etc.), un climat désertique sec et chaud (Biskra, Béchar, Barika, Touggourt, Ghardaïa ... etc.), et un climat tempéré chaud comme la région de Khenchela.
- Les bâtiments soumis à des conditions similaires au climat de Laghouat (tels que Bou Saâda, Naâma ...etc.) peuvent devenir des bâtiments énergivores avec une température de consigne de 22 °C.

En Algérie, ce type de construction appartient aux bâtiments qui ont une étiquette énergétique de type G ou F. En appliquant une isolation extérieure fiable, ces bâtiments vont rejoindre cette fois-ci les constructions de type E ou D. L'enveloppe du bâtiment est responsable de la principale part des consommations. Les principales raisons sont dues aux déperditions thermiques dues aux murs, toits, planchers, dalles, fenêtres et portes.

La diminution des besoins énergétiques est importante si on intègre une couche isolante à l'extérieur de l'enveloppe. Ainsi, l'isolation thermique cette fois-ci peut réduire la consommation globale d'énergie jusqu'à 59.75 % pour une température annuelle entre 20 et 22 °C. Cette réduction est moins importante pour les régions sahariennes, elle est en moyenne estimée à 55.55 % pour Ghardaïa et de 54.25 % pour Adrar. Ces deux sites appartiennent à la même région climatique qui a été spécifiée par un été très chaud. Selon les chiffres, il est à noter que la diminution de la consommation énergétique dans les autres régions (caractérisée par un hiver froid) est généralement supérieure à 58 %.

La meilleure rentabilité est donc observée pour les sites les plus froids en saison de chauffage. L'économie en énergie (59.75%) est la plus élevée dans la région de Khenchela. Ces résultats sont de plus en plus confirmées en déduisant les avantages apportés par l'isolation thermique en termes de besoins de chauffage et de refroidissement séparément ( $T_{\text{conf}} = 20$  °C).

L'économie en énergie en chauffage est en moyenne de 60.19 % pour toutes les régions d'Algérie. La réduction d'énergie est moins intéressante en période de surchauffe, elle est en moyenne de l'ordre de 48.86% sur l'ensemble du territoire algérien. Compte tenu de ce qui précède, il a été indiqué que les conditions météorologiques extrêmes génèrent une grande demande énergétique à une température du confort fixée à 20 et 21 °C. Ces conditions correspondent aux sites d'Adrar et de Batna. Si cette température est. Les conditions extrêmes

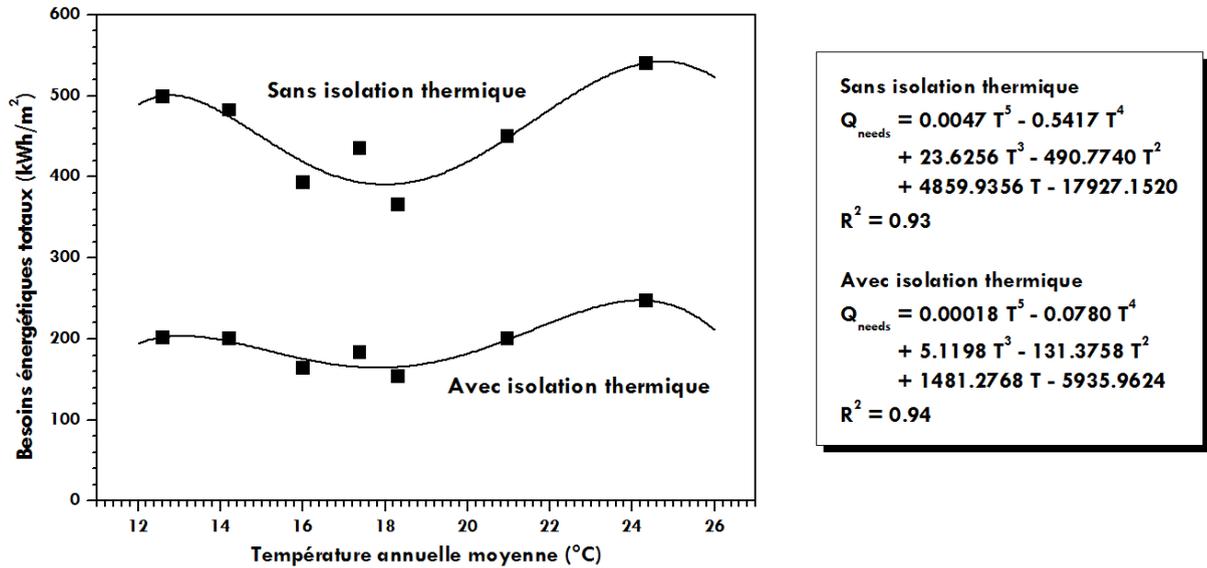
défavorables correspondantes à une température maintenue à 22 °C s'accordent fortement avec les sites d'Adrar et de Khenchela.

### 5.6. Généralisation des résultats par des modèles de prédiction

La généralisation des résultats obtenus ne peut se faire sans certains critères qui devraient être considérés à l'avance afin de limiter les déficiences. Vu le nombre limité d'études de cas, on s'est intéressé dans cette situation au choix approprié des régions climatiques. Notre méthode proposée permettra une généralisation des résultats obtenus en introduisant toutes les régions climatiques, ce qui assure une représentativité appréciable et complète. Dans ces circonstances, le degré de précision de l'approche est considéré comme un indice efficace. L'approche est basée sur deux modèles de prédiction résultant d'une régression non linéaire du cinquième ordre. Une fonction a été utilisée pour un bâtiment non isolé et l'autre pour le même logement mais avec une bonne isolation. Les courbes résultantes pour les régions climatiques couvertes sont montrées sur la figure 5.7.

D'après ces résultats, l'erreur relative relevée pour le site de Laghouat (9.58%) indique que ce cas est le plus défavorable, avec et sans isolation. Pour les autres calculs décrits précédemment, les résultats donnent des valeurs encourageantes. Pour consolider davantage cette méthode, il est opportun de sélectionner puis tester d'autres sites qui ne figurent pas dans le tableau 5.7.

En ce qui concerne la wilaya de Sétif, caractérisée par un climat méditerranéen chaud en été et une température moyenne annuelle avoisinant 13.29 °C, la consommation globale calculée est de 506.38 kWh/m<sup>2</sup>/an, sa valeur prédite par régression est de 496.68 kWh/m<sup>2</sup>/an. Ces valeurs indiquent que l'erreur relative est estimée à 1.91%. Si cette habitation est bien isolée thermiquement, la consommation totale calculée et celle obtenue par le modèle de prédiction sont respectivement de 204.77 et 203.21 kWh/m<sup>2</sup>/an, ce qui est équivalent à une erreur relative estimée à 0.76%.



**Figure 5.7.** Besoins énergétiques totaux (calculés et obtenus par régression non linéaire) en fonction de la température annuelle moyenne pour toute région climatique,  $T_{\text{conf}} = 21 \text{ }^\circ\text{C}$ .

Prenons l'exemple d'une maison résidentielle non isolée située à Bechar. La température moyenne annuelle sur ce site est de  $20.22 \text{ }^\circ\text{C}$ , la consommation équivalente est de  $411.63 \text{ kWh/m}^2/\text{an}$ . L'erreur relative estimée dans ce cas est de  $3.08\%$  sachant que la consommation d'énergie calculée est d'environ  $424.71 \text{ kWh/m}^2/\text{an}$  en utilisant le modèle prédictif donné dans la figure précédente.

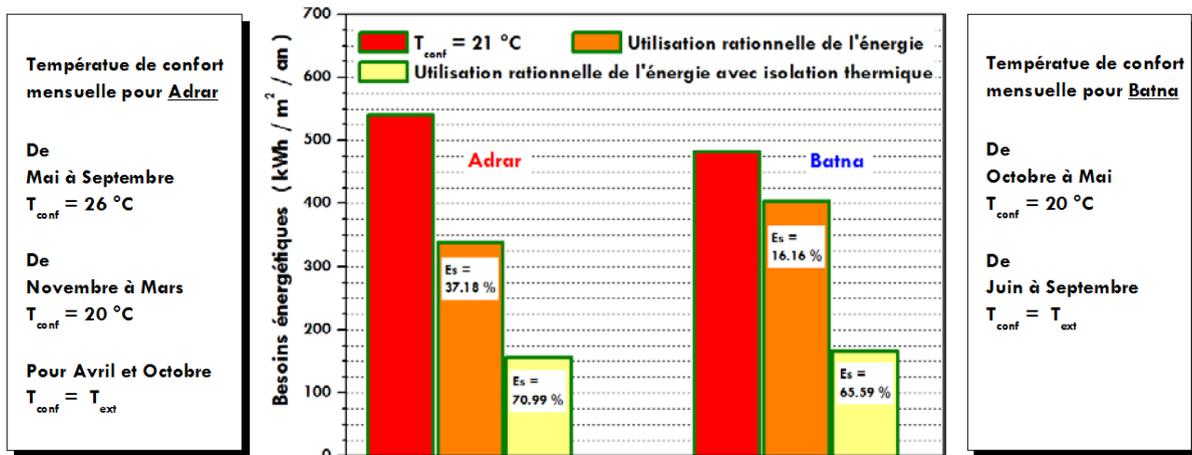
Enfin, pour un immeuble résidentiel bien isolé situé à Illizi, l'erreur relative dans ce cas est de  $3.61\%$  sachant que la température annuelle est de  $25.39 \text{ }^\circ\text{C}$ . Les besoins en énergie calculés et ceux obtenus par la régression non linéaire sont respectivement de  $224.33$  et  $232.42 \text{ kWh/m}^2/\text{an}$ .

### 5.7. Isolation thermique et utilisation rationnelle de l'énergie

En Algérie, le secteur du logement représente près de  $40\%$  de la consommation totale d'énergie provenant de l'électricité conventionnelle. Les procédés de chauffage arrivent en tête de liste avec  $46\%$  de la consommation totale, suivis par la cuisson des aliments ( $22\%$ ), la production d'eau chaude ( $13\%$ ) et les utilisations électriques ( $19\%$ ) [12]. Selon l'état algérien, le prix réel du kWh est de  $10.54 \text{ DZD}$ , son prix de vente moyen est de l'ordre de  $4 \text{ DZD}$  qui

approuve que 7 DA sont subventionnés [13]. Cette situation inacceptable justifie la nécessité d'une réaction rapide en favorisant une culture de rationalisation et en évitant le gaspillage de cette énergie.

Le choix de la température de consigne (confort) est primordial, un choix optimal peut conduire à une diminution très importante. La figure 5.8 traite équitablement cet aspect qui doit être considéré comme un comportement obligatoire pour chaque occupant.



**Figure 5.8.** Économies d'énergie et besoins énergétiques annuels en rationalisant la consommation d'énergie.

Par ce scénario qui semble un comportement simple, les résultats de l'étude dans ce cas indiquent qu'il est possible d'atteindre une économie d'énergie annuelle de l'ordre de 37.18% pour Adrar et de 16.16% pour Batna. La rentabilité de ce comportement humain est donc plus importante dans les zones climatiques caractérisées par un été chaud. Dans le même contexte (utilisation rationnelle de l'énergie), en réalisant une isolation performante, on peut minimiser une quantité d'énergie supplémentaire, passant d'une réduction de 54.25% (résultat donné dans la section 5.5) à une économie d'énergie estimée à 70.99% pour le site d'Adrar. En ce qui concerne le site de Batna, la transition s'est effectuée de 58.52 à 65.59%.

Par ailleurs, pour mener une étude technico-économique, il faudra calculer le temps de retour d'investissement qui sera défini comme le rapport entre le

surcoût résultant et le gain. Le prix du matériau isolant, le coût des travaux d'isolation et la facture énergétique annuelle devront être ajoutés. Le coût retenu d'une plaque de polystyrène (couche de 5 cm d'épaisseur et 2 m<sup>2</sup> de surface) est fixé à 600 DZD. Ceci conclut que le coût total de l'isolation est de 344340.00 DZD. Le prix unitaire actuel de la facture énergétique (10.54 DZD) en Algérie est différent par rapport au prix moyen européen (18.64 c € / kWh) [14]. Pour assurer les besoins énergétiques totaux de cette maison d'habitation, y compris le confort intérieur dans toutes les zones à 21 °C, la facture énergétique annuelle (non subventionnée) s'élève respectivement à 1668404.53 et 1489641.39 DZD sous les régimes climatiques d'Adrar et Batna.

En Europe, le coût des travaux d'isolation est effrayant et lourd (entre 40 et 120 €/m<sup>2</sup>), mais le retour sur investissement est vraiment important [15]. En revanche, en Algérie les prix des travaux d'isolation thermique sont moins chers (1800 DZD/m<sup>2</sup>) par rapport au pays européens. La même chose concernant le temps de retour d'investissement. En conséquence, le prix des travaux d'isolation pour cette habitation est équivalent à 1139058.00 DZD.

Le surcoût est la différence entre la charge totale (coût des travaux, prix de l'isolant et la facture énergétique) et la facture énergétique initiale (sans isolation thermique).

Pour Adrar, la charge totale est d'environ 1967334.09 DZD (344340.00 + 1139058.00 + 483936.09). 483936.09 DZD est la facture énergétique calculée en rationalisant la consommation d'énergie et en intégrant un isolant thermique. Le surcoût est égal à  $1967334.09 - 1668404.53 = 298929.56$  DZD.

Pour Batna, le coût total est estimé à 1995929.74 (344340.00 + 1139058.00 + 512531.74). 512531.74 DZD est la facture énergétique calculée en rationalisant la consommation d'énergie et en intégrant une isolation thermique renforcée. Le surcoût sera équivalent à  $1995929.74 - 1489641.39 = 506288.35$  DZD. Le gain est défini comme étant la différence entre la facture

d'énergie initiale et la nouvelle facture (avec isolation thermique). Il est équivalent à  $(1668404.53 - 483936.09 = 1184468.44 \text{ DZD})$  pour Adrar et  $(1489641.39 - 512531.74 = 977109.65 \text{ DZD})$  pour Batna.

La valeur du temps de retour d'investissement, exprimée par le nombre de mois, est le rapport entre le surcoût multiplié par 12 et le gain financier annuel des techniques conceptuelles précédentes. Si on considère que la consommation équivalente est répartie de manière équitable sur tous les mois, le temps de retour sur investissement est de :

$$(298929.56 * 12) / 1184468.44 = 3,28 \text{ mois pour Adrar}$$

Et

$$(506288.35 * 12) / 977109.65 = 6,2 \text{ mois pour Batna}$$

Ces résultats encouragent et motivent les citoyens à intégrer des bâtiments bien isolés. Ces courtes périodes sont dues principalement à la facture énergétique qui est très élevée en l'absence d'une isolation adéquate. D'autre part, l'alliance de cette situation avec les bas prix du processus d'isolation (coût des travaux d'isolation et d'isolation) donne un surcoût plus ou moins faible par rapport au gain financier lié à cette opération.

## 5.8. Conclusion

Notre travail nous a donné de nouvelles évaluations qui ont permis le calcul des besoins énergétiques d'un habitat résidentiel, y compris l'énergie utilisée pour le chauffage, le système de refroidissement, la ventilation, la production d'eau chaude et l'éclairage. Une évaluation détaillée a été élaborée afin de considérer différents types d'utilisation de l'énergie. Ainsi, la consommation d'énergie sera réduite si la performance énergétique des bâtiments est élevée. Comme résultat direct, avant toute conception, il est préférable de résoudre les problèmes des déperditions thermiques dans le logement pour avoir un investissement vraiment efficace. L'enveloppe du bâtiment est responsable des

principales sources des déperditions et des charges les plus importantes qui affectent l'utilisation de l'énergie de chauffage et de refroidissement.

Assurer une isolation thermique efficace est très important. Un habitat résidentiel type qui ne contient pas de mesures d'efficacité énergétique a été considéré pour étudier l'influence d'isolation thermique appliquée aux composants opaques sur la charge de chauffage et de refroidissement. L'isolation extérieure est la solution la plus efficace car elle élimine les ponts thermiques et maintient l'inertie thermique des murs intérieurs malgré le fait qu'elle soit la plus chère. Cette étude implique l'utilisation de cette stratégie passive pour collecter des informations utiles pour cette technique qui évite les pertes thermiques par des jonctions (portes et fenêtres comprises) et favorise une diminution d'une quantité d'énergie supplémentaire, passant d'une réduction de 54.25% à une économie d'énergie estimée à 70.99% pour le site Adrar. En ce qui concerne le site de Batna, la transition économique est de 58.52 à 65.9%. La charge électrique peut être alimentée par de l'électricité renouvelable (l'intégration des panneaux solaires PV avec la structure du bâtiment peut offrir une meilleure solution car ces dispositifs ont plusieurs avantages économiques et écologiques.

Ensuite, nous avons étudié l'impact énergétique des gains de chaleur internes liés aux activités des occupants et à l'utilisation quotidienne des équipements électriques. Par ce scénario d'occupation qui semble un comportement simple, les résultats indiquent qu'il est possible d'atteindre une économie d'énergie annuelle de l'ordre de 37.18% pour Adrar et de 16.16% pour Batna. La rentabilité de ce comportement humain est donc plus importante dans les zones climatiques caractérisées par un été chaud.

## Références

1. L. Chesné, vers une nouvelle méthodologie de conception des bâtiments basée sur leurs performances bioclimatiques, Thèse de Doctorat, Centre de Thermique de Lyon, Institut National des Sciences Appliquées de Lyon, Ecole Doctorale MEGA, 2012.
2. I. Sobhi, Modélisation dynamique et monitoring d'une maison moderne à Marrakech : propositions pour améliorer ses performances énergétique, Thèse de Doctorat en physique, Université Cadi Ayyad, Laboratoire des Energies Renouvelables et Efficacité Energétique, 2017.
3. C. Flory-celini, Modélisation et positionnement de solutions bioclimatiques dans le bâtiment résidentiel existant, Thèse de Doctorat en génie civil, Université Lyon 1 Claude Bernard, 2008.
4. Belgherras, S., Bekkouche, S.M.A., Benouaz, T., Benamrane, N., Prospective analysis of the energy efficiency in a farm studio under Saharan weather conditions, *Energy and Buildings*, 145, 342–353, 2017.
5. Bekkouche, S.M.A., Benouaz, T., Hamdani, M., Cherier, M.K., Yaiche, M.R., Benamrane, N., Diagnosis and comprehensive quantification of energy needs for existing residential buildings under Sahara weather conditions, *Advances in Building Energy Research*, Pages 37-51, 2016.
6. Cherier, M.K., L'utilisation passive de l'énergie solaire dans les habitats de Ghardaïa, Doctorat en Sciences Spécialité Énergies Renouvelables, Université Abou-bakr belkaïd, Tlemcen, Juin 2018.
7. <http://www.radiateur-electrique.info/deperdition-de-chaleur.php#coefficient-G>
8. Cherier, M.K., L'utilisation passive de l'énergie solaire dans les habitats de Ghardaïa, Doctorat en Sciences Spécialité Énergies Renouvelables, Université Abou-bakr belkaïd, Tlemcen, Juin 2018.
9. Boukli Hacene, M.A., Aspects énergétiques, économiques et environnementaux d'une habitation écologique, Thèse de Doctorat en physique énergétique et matériaux, Université de Tlemcen, 2013.
10. Places in Algeria (<https://weather-and-climate.com/average-monthly-Rainfall-Temperature-Sunshine-in-Algeria>)
11. Climat: Algérie (<https://fr.climate-data.org/country/164/>).
12. <http://www.radioalgerie.dz/news/fr/article/20151117/58487.html>
13. [lejournaldelemploi.dz/sonelgaz-campagne-de-sensibilisation-pour-rationaliser-la-consommation-delectricite/](http://lejournaldelemploi.dz/sonelgaz-campagne-de-sensibilisation-pour-rationaliser-la-consommation-delectricite/)
14. [http:// webnrj.com/pages/prix-du-kilowattheure-d-electricite](http://webnrj.com/pages/prix-du-kilowattheure-d-electricite).
15. [http:// www.calculeo.fr/Subventions/Isolation-thermique/Prix](http://www.calculeo.fr/Subventions/Isolation-thermique/Prix).

# **Conclusion générale**

## Conclusion générale

Les rapports successifs des experts du changement climatique et des organisations internationales, la fluctuation des prix des hydrocarbures et ses conséquences sur la situation actuelle de l'Algérie, chaque jour nous rappelle l'urgence de développer des techniques innovantes pour apporter des solutions, au moins partielles, à la double problématique de l'anéantissement des ressources et de la lutte contre la pollution. Le problème énergétique de l'Algérie est un problème qui se pose en termes de stratégie de valorisation de ces ressources pour les besoins du développement du pays, et de définition immédiate d'un modèle cohérent de consommation énergétique couvrant le court et le moyen terme. Le secteur du bâtiment porte une part non négligeable de la facture énergétique nationale, il constitue donc une cible privilégiée des politiques d'efficacité énergétique liées à la sécurité d'approvisionnement énergétique et aux changements climatiques.

Dans ce contexte, la loi algérienne sur la maîtrise de l'énergie et les textes réglementaires mis en place sont venus fixer le modèle de consommation énergétique national et définir le cadre général des différentes actions à mener pour parvenir le plus rapidement possible à une rationalisation de l'emploi des énergies disponibles et à une meilleure maîtrise de la consommation énergétique. Outre, la nécessaire de diversification énergétique qui vise essentiellement une rapide intégration des énergies renouvelables (solaire photovoltaïque et thermique, éolienne, géothermique et biomasse) dont dispose en abondance l'Algérie, le développement des économies d'énergie est un axe très important de la démarche préconisée par cette loi.

C'est pour contribuer à cet effort visant la réalisation d'économies d'énergies dans le secteur de l'habitat que cette étude a été effectuée. Elle consiste à mettre en évidence l'efficacité énergétique pour l'obtention d'un niveau de confort thermique plus acceptable avec une consommation énergétique réduite en étudiant l'influence de l'enveloppe du bâtiment sur sa demande énergétique. Pour faire face, nous avons effectué un diagnostic et une évaluation

de besoins énergétiques d'une construction réelle multizone énergivore. Les besoins énergétiques de chauffage et de climatisation ont été calculés en fonction de l'emplacement et la composition des différentes parois en utilisant la méthode de degrés jours. En conséquence, ce travail de recherche a montré que des économies financières importantes peuvent être réalisées en améliorant l'isolation du bâtiment et en utilisant raisonnablement l'énergie. Suite à ces résultats, des économies d'énergie peuvent être réalisées grâce à une enveloppe de bâtiment appropriée. L'isolation extérieure appliquée aux composants opaques est la solution la plus efficace car elle élimine les ponts thermiques et maintient l'inertie thermique des murs intérieurs malgré son coût plus au moins élevée. L'influence de ce concept passif sur la charge de chauffage et de refroidissement est importante car elle favorise une diminution d'environ 60%. Les conditions météorologiques extrêmes sont tout autour des zones de Batna et d'Adrar. Les constructions sont inefficaces sur le plan énergétique et inconfortables dans ces zones climatiques. L'isolation thermique et l'utilisation rationnelle de l'énergie ont permis une réduction de la consommation énergétique de près de 71%.

Attribuer des étiquettes énergétiques aux bâtiments est un pas en avant. En mettant en œuvre cette approche de modélisation récente, il est possible de définir un simple diagramme d'étiquetage énergétique basé sur notre bilan énergétique. Avant de s'engager à construire un bâtiment résidentiel, il sera possible de délivrer un label énergétique en fournissant des paramètres, des scénarios d'occupation, le style et le mode de vie des occupants et toutes les données nécessaires. Cependant, il est possible d'adresser un modèle global de besoins énergétiques quelque soit le niveau d'isolation tout en couvrant l'ensemble du territoire algérien. La généralisation de cette méthode pour d'autres pays semble très faisable.

Dans le secteur du bâtiment, l'Etat algérien subventionne le prix du kilowattheure. Mais selon les résultats obtenus, pour les constructions nouvelles et futures, il est plus judicieux de subventionner le coût de l'ensemble du processus d'isolation au lieu d'investir dans la facture énergétique correspondante. Pour les

bâtiments anciens, il vaut mieux subventionner la rénovation énergétique puis cesser de subventionner la facture énergétique.

Avec une utilisation plus efficace de l'énergie et en intégrant une forte isolation thermique de l'enveloppe du bâtiment, les charges financières énergétiques (en se basant sur le prix réel du kilowattheure) qui devront être payées par le citoyen algérien resteront au pire des cas les mêmes (peuvent devenir moindres) par rapport à la facture énergétique actuellement adoptée (avec subvention du kilowattheure) sans prendre en compte les meures de l'efficacité énergétique. Ces démarches aideront aussi à conserver les ressources énergétiques du pays.

En fait, les solutions les plus fiables sont les outils d'énergie de simulation pour estimer l'impact des alternatives de conception et mieux comprendre les problèmes de conception dans le respect de la performance énergétique. Les outils de simulation courants comme Simbad, Energy + et Trnsys 17 sont un bon moyen de simuler et d'analyser le bâtiment et les systèmes, mais ces logiciels exigent toutefois une quantité considérable de données et un temps de simulation plus au moins long, nécessitant dans certains cas, des équipements informatiques puissants. Avant ou pendant la conception d'un projet, des solutions multiples devraient être proposées et étudiées, mais le manque de temps et les entrées de données complexes empêchent ce processus d'optimisation et d'analyse.

C'est dans ce contexte que s'inscrit notre contribution, on pourra à l'avenir étendre notre contribution en intégrant des valeurs instantanées. Nous chercherons surtout de trouver un compromis entre des méthodes simples et complexes qui peuvent se rapprocher avec une très grande précision aux résultats aux données obtenues à partir des campagnes expérimentales.

Nous souhaitons enfin, que ce travail puisse contribuer à sensibiliser davantage les étudiants sur l'intérêt de ce thème, et que notre modeste thèse trouvera sa place dans les laboratoires de notre université.

## Production Scientifique

1. **H. Kadraoui**, S.M.A. Bekkouche, A. Chikhaoui, Analysis of energy consumption for Algerian building in extreme North-African climates, International Journal of Sustainable Energy Planning and Management Vol 19 2019 45–58, <http://dx.doi.org/10.5278/ijsepm.2019.19.5>
2. **H. Kadraoui**, S.M.A. Bekkouche, Analysis of energy consumption for Residential Buildings under Mediterranean climate Conditions, Journal for Studies in Management and Planning ISSN: 2395-0463, Volume 04 Issue 11 November 2018 , <https://pen2print.org/index.php/jsmap/>
3. S.M.A. Bekkouche, N. Benamrane, M.K. Cherier, M. Hamdani, T. Benouaz, S. Belgherras, S. Bendara, **H. Kadraoui**, Application of some solar passive concepts to create more energy efficient studio apartment, 2017 International Renewable and Sustainable Energy Conference (IRSEC), Date Added to IEEE Xplore: 01 October 2018, DOI: 10.1109/IRSEC.2017.8477274

## Résumé

Les travaux entrepris dans cette thèse ont porté sur l'analyse, le diagnostic et l'amélioration de l'efficacité énergétique d'une construction énergivore. Pour ce faire, des mesures ont été adoptées pour réduire les besoins énergétiques (chauffage et climatisation) sous l'effet de différents régimes climatiques. Nous nous intéressons aussi à des modèles de prédiction qui puissent estimer, le plus efficacement possible, la consommation d'énergie potentielle requise pour atteindre un niveau de confort approprié couvrant ainsi toutes les zones climatiques de l'Algérie. Les résultats indiquent que les conditions météorologiques extrêmes sont autour de Batna et Adrar. L'isolation thermique et l'utilisation rationnelle de l'énergie peuvent conduire à une réduction des charges énergétiques de près de 71%. De ce fait, il est possible d'attribuer des modèles de prédiction en fonction du niveau d'isolation bâtiment et de la température moyenne annuelle du site en question. Il est à noter aussi qu'il est plus judicieux de subventionner le coût de l'ensemble du processus d'isolation au lieu de subventionner la facture énergétique correspondante.

**Mots clés :** Température, Humidité relatif, Consommation énergétique, Diagnostic, Déperditions de l'enveloppe, Besoin annuel et mensuel.

## Abstract

In this thesis, conducted research works have been focused mainly on the analysis, diagnosis and improvement of the energy efficiency of an energy-intensive building. To cope with this situation, some measures have been adopted to reduce energy needs (heating and cooling) under different climatic regimes. Prediction models have been proposed to estimate, as efficiently as possible, the potential energy consumption required to reach an appropriate level of comfort for all the climatic zones of Algeria. The results indicate that extreme weather conditions are around Batna and Adrar. Thermal insulation and the rational use of energy can lead to a reduction in energy loads of up to 71%. As a result, it is possible to assign prediction models based on the level of building insulation and the average annual temperature of the site. It should also be noted that it is wiser to subsidize the cost of the entire insulation process instead of subsidizing the corresponding energy bill.

**Keywords:** Temperature, Relative humidity, Energy consumption, Diagnosis, Envelope loss, Annual and monthly needs.

## ملخص

لقد كان العمل المنجز في هذه الرسالة مركزا على تحليل، تشخيص وتحسين كفاءة الطاقة في بناء مستهلك للطاقة. للقيام بذلك، تم اتخاذ تدابير للحد من متطلبات الطاقة (التدفئة والتبريد) تحت تأثير أنماط الطقس المختلفة. اهتمامنا كان منصبا أيضا بنماذج التنبؤ التي يمكن أن تقدر، بأكبر قدر ممكن من الكفاءة، الاستهلاك المحتمل للطاقة اللازمة للوصول إلى مستوى مناسب من الراحة، آخذين بعين الاعتبار كل المناطق المناخية في الجزائر. تشير النتائج إلى أن الظروف الجوية القاسية توجد حول باتنة و أدرار. يمكن أن يؤدي العزل الحراري والاستخدام الرشيد للطاقة إلى انخفاض في أحمال الطاقة بنسبة تصل إلى 71%. ونتيجة لذلك، من الممكن تعيين نماذج التنبؤ على أساس مستوى العزل المبني ومتوسط درجة الحرارة السنوية للموقع المعني. وتجدر الإشارة أيضًا إلى أنه من الحكمة دعم تكلفة عملية العزل بأكملها بدلًا من دعم فاتورة الطاقة المقابلة.

## الكلمات المفتاحية

درجة الحرارة، الرطوبة النسبية، استهلاك الطاقة، التشخيص، فقدان الحرارة، الحاجة السنوية والشهري