

République algérienne démocratique et populaire
Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique
Université Abderrahmane Mira – Bejaia



Faculté de Technologie
Département d'Architecture

Thème :

**La rénovation thermique des bâtiments comme
moyen pour une efficacité énergétique**

**Mémoire présenté pour l'obtention du diplôme de Master II en Architecture
« Spécialité Architecture »**

Préparé par : **Syrine GHILASSI**

Pr.		Département architecture de Bejaia	Président de jury
Dr. KHADRAOUI Mohamed Amine		Département architecture de Bejaia	Rapporteur
Pr.		Département architecture de Bejaia	Examineur
Mr.			Invité

Année Universitaire 2020 - 2021

*** Remerciements ***

En premier lieu, nous remercions DIEU le tout puissant pour son aide, de nous avoir donné la volonté, le courage et la patience pour accomplir ce travail.

Nous tenons à remercier nos très chers parents, nos frères et nos sœurs pour nous avoir apporté patience et soutien tout au long de ce parcours d'études.

Notre gratitude et profonde reconnaissance s'adressent à notre rapporteur Dr Mohamed Amine KHADRAOUI et notre co-rapporteur M. Samir ALLOUACHE pour leurs remarques bienveillantes et leur orientation, pour leurs conseils précieux et savoir qu'ils nous ont transmis tout le long de notre travail.

Nous remercions sincèrement les membres de jury de bien vouloir évaluer ce travail.

Enfin, nous adressons nos remerciements à toute personne qui a apporté son aide et qui a contribué à l'élaboration de ce mémoire ainsi qu'à la réussite de cette année universitaire.

*** Dédicaces ***

Je tiens à dédier ce travail :

À mes très chers PARENTS, pour leurs sacrifices, leurs tendresses, leurs soutiens et leurs prières tout au long de mes études.

À mes très chères sœurs, ASMA et ELYNE, ainsi qu'à mon frère ALAEDDINE, pour leur soutien, leurs sacrifices et le courage qu'ils m'ont apporté tout au long de mon parcours.

À la mémoire de mes grands-parents, et à ma chère grand-mère, TIHA, pour tous ses douaa et son amour. Ainsi, qu'à toute ma famille.

À tous ceux qui me sont cher.

Mlle. Syrine GHILASSI

Table des matières

Résumés
Liste des tableaux
Listes des figures
Nomenclature

CHAPITRE INTRODUCTIF

1. Introduction générale	01
2. Problématique	02
3. Hypothèses	02
4. Analyse conceptuelle	03
5. Contexte et objectif	03
6. Méthodologie	04

CHAPITRE I : LE CONFORT THERMIQUE

Introduction	06
I.1. La pluridisciplinarité du confort thermique	06
I.2 L'aspect physiologique	06
I.2.1. La thermorégulation végétative.....	07
I.2.2. La thermorégulation comportementale.....	10
I.3 L'aspect physique.....	10
I.3.1. Les modes de transfert de chaleurs.....	10
I.3.2. L'influence des vêtements.....	11
I.4. L'aspect psychologique.....	12
I.5. Paramètres météorologiques influents sur le confort thermique.....	14
I.5.1. Température de l'air.....	14
I.5.2. Humidité relative de l'air.....	15
I.5.3. Ensoleillement.....	16
I.5.4. Le vent	17
I.6. Efficacité Énergétique ; une problématique mondiale.....	17
I.6.1. Changement climatique	19
I.6.1.1. Gaz à effet de serre	19
I.6.1.2. Le réchauffement planétaire	20
I.6.2. Cadre mondial.....	21
I.6.3. Cadre Algérien.....	24
I.6.4 Les énergies renouvelables	26
I.6.4.1. Les types d'énergies renouvelables	27
I.6.5. La réglementation thermique en Algérie	27
Conclusion.....	28

CHAPITRE II : LA RÉNOVATION THERMIQUE

Introduction.....	30
--------------------------	-----------

II.1. Définition de la rénovation	30
II.2. Transformé ou démolir	31
II.3 Rénover globalement ou partiellement.....	32
II.4 Stratégie de rénovation	33
II.5 Technique de rénovation passive	36
II.6. Technique de rénovation active	36
II.7. Mesure de rénovation	36
II.8. Les ponts thermiques	37
II.9. L'isolation thermique	38
II.9.1. La résistance thermique des matériaux	38
II.9.2. L'inertie thermique	38
II.9.3. Choix de l'isolant thermique	39
II.9.3.1. Isolation thermique intérieur (ITI)	40
II.9.3.2. Isolation thermique extérieur (ITE)	42
II.9.3.3. L'isolation par remplissage de la coulisse	44
II.9.3.4. Les planchers	45
II.9.3.5. Isolation de la toiture	46
II.10. Les fenêtres	47
II.11 L'étanchéité à l'air	48
II.11.1 Ventilation naturelle	48
II.11.2 Ventilation mécanique	48
II.12. Systèmes de chauffage	50
II.12.1. Pompe à chaleur (PAC)	51
II.12.2. Solaire thermique et photovoltaïque	51
II.13 Protections solaires	52
Conclusion	52

CHAPITRE III : ÉTUDE SUR TERRAIN QUANTITATIVE ET QUALITATIVE

Introduction.....	54
III.1 Étude empirique quantitative	54
III.1.1 Présentation de la ville de Bejaïa et son climat	54
III.1.2 Climatologie de la ville de Bejaïa	55
III.2 Présentation des cas d'études	55
III.2.1 Projet 01 : Le bloc administratif	56
III.2.1.1. La composition des parois	57
III.2.1.2. Les installations techniques	59
III.2.2. Projet 02 : la direction des travaux publics DTP de Bejaïa	59
III.2.2.1. La composition des parois	61
III.2.2.2 Les installations techniques	62

III.3. Protocole et instrument de prise de mesure	62
III.3.1 Le choix des points de mesures du cas d'étude 01	63
III.3.2 Le choix des points de mesures du cas d'étude 02	64
III.4. Résultat et interprétation des mesures in situ	65
III.5 Étude empirique qualitative.....	69
III.5.1. Protocole de distribution du questionnaire	69
III.5.2. Résultat et interprétation du questionnaire	69
Conclusion	76

CHAPITRE IV : SIMULATION NUMÉRIQUE

Introduction.....	78
IV.1 Présentation du logiciel <i>Energy Plus</i>	78
IV.2 Les étapes principales de travail	78
IV.3. Résultats et interprétation de la simulation du modèle réel	80
IV.4. Optimisation du modèle	83
IV.4.1. Résultats et interprétation de la simulation du modèle avec optimisation	84
Conclusion	86
Conclusion générale	87
Recommandation	89
Limites de recherche	89
Perspectives de recherche	89
Bibliographie.....	90
Annexe.....	95

RESUMES

Le globe terrestre connaît en cette décennie des changements climatiques colossale ayant procurer des conséquences dramatiques causé par la consommation excessive des énergies fossiles. Dans cette recherche, nous nous sommes intéressés à la rénovation thermique des bâtiments dans le but d'améliorer leur performance énergétique, étant un des secteurs des plus énergivores. Dans ce cadre, nous avons réalisé deux contributions. Dans la première contribution, nous avons établi un état de l'art sur les notions de confort thermique et sa contribution dans la réduction de la consommation énergétique. Ainsi que les différentes méthodes d'application de la rénovation thermique dans le cadre d'une transition énergétique des bâtiments existants. Cela nous a permis de cerner les solutions les plus optimales à appliquer dans les bâtiments existants. Dans la deuxième contribution, nous avons effectué deux études empiriques. L'une consiste en une prise de mesures de températures de bureaux au sein de deux cas d'études ayant des compositions de parois extérieures différentes, afin d'étudier leur comportement thermique et leur influence sur le confort thermique des employées. Nous avons constaté que les deux parois impliquent des besoins de refroidissement en été et de réchauffement en hiver. Ils ne présentent donc pas de performance énergétique. L'autre étude empirique soit un questionnaire distribué sur les employées d'un des cas d'étude. Il s'est avéré que ces derniers ne sont pas satisfaits de l'ambiance thermique de leur lieu de travail dans les conditions naturels. Une simulation énergétique a été effectuée pour l'autre cas d'étude afin d'appliquer des optimisations (en termes d'isolant thermique intérieur et extérieur) et d'en tirer des recommandations. Enfin nous avons retiré des recommandations à partir de ces deux contributions.

Mots clés : rénovation thermique, efficacité énergétique, parois extérieures, isolant thermique.

ABSTRACT

In this decade, the terrestrial globe is experiencing colossal climatic changes which have had dramatic consequences caused by the excessive consumption of fossil fuels. In this research, we were interested in the thermal renovation of buildings with the aim of improving their energy performance, being one of the most intensive energy sectors. In this context, we have made two contributions. In the first contribution, we reviewed some works established in the literature on the concepts of thermal comfort and its contribution to reducing energy consumption. As well as the different methods of applying thermal renovation as part of an energy transition of existing buildings. This allowed us to identify the most optimal solutions to apply in existing buildings. In the second contribution, we carried out two empirical studies. One consists of taking office temperature measurements in two case studies with different exterior wall compositions, in order to study their thermal behavior and their influence on the thermal comfort of employees. We have found that the two walls imply cooling needs in summer and heating in winter. They therefore have no energy performance. The other empirical study consisted of a questionnaire distributed to the employees of one of the case studies. It turned out that the latter are not satisfied with the thermal environment of

their workplace under natural conditions. An energy simulation was performed for the other case study in order to apply optimizations (in terms of interior and exterior thermal insulation) and to derive recommendations. Finally, we have withdrawn recommendations from these two contributions.

Keywords: thermal renovation, energy efficiency, external walls, thermal insulation.

Liste des tableaux

Tableau 1.1 : Chaleur métabolique selon différentes activités (ASHRAE, 1997) (Grundströme <i>et al.</i> , 2003).....	07
Tableau 1.2 : Valeurs clo pour différents vêtements (ASHRAE, 1997) (Grundströme <i>et al.</i> , 2003).....	10
Tableau 1.3 : Les échelles de la sensation thermique selon l'ASHRAE.....	12
Tableau 1.4 : Évolution de la température par rapport aux années 1850-1900 (NOAA, national oceanic and atmospheric administration, National Centers for Environmental Information, 2021).....	21
Tableau 2.1 : Potentiel d'amélioration de la performance énergétique des constructions en litre de mazout par mètre carré par an avant et après rénovation (Markus, Lucie, PFLUG, & Bettina, 2014).).....	30
Tableau 2.2 : Code de dégradation et d'intervention donnés par EPIQR (EPIQR, 2018) ..	33
Tableau 2.3 : Critères à prendre en compte avant l'entreprise d'un projet de rénovation (Markus, Lucie, PFLUG, & Bettina, 2014).....	34
Tableau 2.4 : Caractéristiques des matériaux isolants (Guide des matériaux isolants).....	40
Tableau 3.1 : Caractéristiques thermiques des matériaux qui composent la paroi extérieure du cas d'étude 01 (Source : D.T.R, 1997 ; Adapté par l'auteur, 2021).....	58
Tableau 3.2 : Caractéristiques thermiques des matériaux qui composent les parois extérieures du cas d'étude 02 (Source : D.T.R, 1997 ; Adapté par l'auteur, 2021).....	62
Tableau 3.3 : Les spécificités de chaque bureau du cas d'étude 01 (Auteur, 2021).....	64
Tableau 3.4 : Les spécificités de chaque bureau du cas d'étude 02 (Auteur, 2021).....	65
Tableau 4.1 : Données de météo de températures de la ville de Bejaïa (Auteur, 2021).....	81
Tableau 4.2 : Caractéristiques des matériaux composants de la paroi extérieur après l'optimisation (Auteur, 2021).....	84

Liste des figures

Figure 1.1 : Schéma explicatif de la structure du mémoire (Source : Auteur, 2021).....	03
Figure 1.2 : Principe de la thermorégulation végétative, technologique et comportementale (Source : MOUJALLED, 2007).....	08
Figure 1.3 : Rétroaction de l'ajustement comportemental (Source : Thellier, 2007 ; Richard, 1998).	09
Figure 1.4 : Modèles du comportement thermique des vêtements. (À gauche le modèle à un seul paramètre : l'isolement thermique et à droite le modèle à deux paramètres : l'isolement thermique et la résistance à l'évaporation) (Source : Parsons, 2003).....	11
Figure 1.5 : La relation globale entre une personne et son environnement (Source : Berger, 1995).	13
Figure 1.6 : PPD des personnes au repos et des personnes en travail léger (Benjeddou & Jedidi, 2016).	14
Figure 1.7 : Les plages de confort température-humidité (Benjeddou & Jedidi, 2016).	16
Figure 1.8 : Motivations pour la prise de décision municipale à propos de l'énergie (IRENA, 2021).	18
Figure 1.9 : Évolution des gaz à effet de serre depuis la période préindustrielle (State of the Global Climate 2020, 2021).	20
Figure 1.10 : Évolution de la température annuelle mondiale depuis la période préindustrielle (NOAA, national oceanic and atmospheric administration, National Centers for Environmental Information, 2021).	21
Figure 1.11 : La répartition de la consommation d'énergie total final à son image finale (REN21, 2020).	22
Figure 1.12 : Répartition des émissions de CO2 dues à l'énergie au monde (Sédillot, 2021).	22
Figure 1.13 : Répartition du pourcentage de l'utilisation de chaque énergie renouvelable et non renouvelable, dans le bâtiment (REN21, 2020).	23
Figure 1.14 : Part des énergies renouvelables parmi la consommation totale d'énergie finale, 1990 – 2018 (The Energy Progress Report, 2021).....	24
Figure 1.15 : État des Intensités Énergétiques en 2005 (APRUE, Consommation Énergétique Finale de l'Algérie, 2007).	25
Figure 1.16 : Estimation de la part des énergies renouvelables dans la TFEC (REN21, 2020).....	26
Figure 2.1 : Comparaison des émissions des GES et d'énergie grise entre une nouvelle.....	32
Figure 2.2 : Exemple d'étiquette énergétique et de bilan énergétique (EPIQR+, 2014).....	34
Figure 2.4 : Les nœuds pouvant constituer des ponts thermiques (Markus, Lucie, PFLUG, & Bettina, 2014).....	37
Figure 2.3 : Stratégie de stockage des apports de chaleur la journée et la nuit (Jean Louis & Franck, 2017)	39
Figure 2.4 : Isolation par l'intérieur avec système de lattage (ISOLATION THERMIQUE DES MURS CREUX, 1998).....	41
Figure 2.5 : Mur en brique traditionnelle avec ITI (Jean Louis & Franck, 2017).....	41

Figure 2.6 : Mur en béton cellulaire avec ITI (Jean Louis & Franck, 2017).....	42
Figure 2.7 : Isolation par l'extérieur (ISOLATION THERMIQUE DES MURS CREUX, 1998).....	43
Figure 2.8 : Mur ancien en pierre avec ITE (Jean Louis & Franck, 2017).....	43
Figure 2.9 : Mur en agglo de ciment creux avec ITE (Jean Louis & Franck, 2017).....	44
Figure 2.10 : Isolation par remplissage de la coulisse (ISOLATION THERMIQUE DES MURS CREUX, 1998).....	45
Figure 2.11 : Isolation d'un plancher bas sur dalle en béton (Jean Louis & Franck, 2017)....	45
Figure 2.12 : Isolation d'une toiture avec tuile sur comble perdus (Jean Louis & Franck, 2017).	46
Figure 2.14 : Élément d'une fenêtre influant sur son coefficient de transmission (Markus, Lucie, PFLUG, & Bettina, 2014).....	47
Figure 2.15 : Schéma explicatif de l'installation de ventilation simple (Bâtiments d'habitation : Systèmes d'aération standard, 2013)	49
Figure 2.16 : Principe de fonctionnement d'un puits canadien (Puits canadien Puits provençal, 2017).....	50
Figure 2.17 : Schéma de conception d'une PAC (François, 2017).....	51
Figure 2.18 : Intégration d'un panneaux semi transparents de MSK en façade (Markus, Lucie, PFLUG, & Bettina, 2014).....	52
Figure 3.1 Situation de la ville de Bejaia par rapport au littorale.....	54
Figure 3.2 : Météo et Moyenne des températures mensuelles à Bejaïa 2015 – 2021 (http://hikersbay.com/)	55
Figure 3.3 : Vue aérienne sur le cas d'étude 01. (Source : https://www.sunearthtools.com/ Adapté par l'auteur, 2021)	56
Figure 3.4 : Plan masse du Bloc administratif (Auteur,2021).....	56
Figure 3.5 : Vue sur le Bloc administratif (Auteur, 2021)	57
Figure 3.6 : Vue de coupe sur la paroi extérieur du cas d'étude 01 (Source : D.T.R, 1997 ; Adapté par l'auteur, 2021)	58
Figure 3.7 : Vue aérienne sur le cas d'étude 02. (Source : https://www.sunearthtools.com/ Adapté par l'auteur, 2021)	59
Figure 3.8 : Plan masse de la DTP de Bejaïa	60
Figure 3.9 : Vue sur la DTP de Bejaïa (Auteur, 2021)	60
Figure 3.10 : Vue de coupe sur les parois extérieures des deux parties de la DTP (Source : D.T.R, 1997 ; Adapté par l'auteur, 2021).	61
Figure 3.11 : Thermomètre hygromètre numérique LCD intérieur / extérieur – Ta138 (JUMIA, 2021).....	63
Figure 3.12 : Situation des points de mesures du Bloc administratif (Auteur, 2021)	63
Figure 3.13 : Situation des points de mesures de la DTP de Bejaïa (Auteur, 2021).....	64
Figure 3.14 : Les températures prise au sein du bureau 01 du bloc administratif (Source : Auteur, 2021)	65
Figure 3.15 : Les températures prise au sein du bureau 02 du bloc administratif (Source : Auteur, 2021)	66

Figure 3.16 : Les températures prise au sein du bureau 01' de la DTP de Bejaïa (Source : Auteur, 2021)	67
Figure 3.17 : Les températures prise au sein du bureau 02' de la DTP de Bejaïa (Source : Auteur, 2021)	68
Figure 3.18 : Jugement de la température au sein des bureaux de la partie nouvelle (A) et la partie ancienne (B) pendant l'été (Auteur, 2021).	70
Figure 3.19 : Solution pour résoudre le problème de chaleur dans la partie nouvelle (A) et la partie ancienne (B) (Auteur, 2021).	70
Figure 3.20 : Les horaires de recours à la solution à la chaleur de la partie nouvelle (A) (Auteur, 2021).	71
Figure 3.21 : Les horaires de recours à la solution à la chaleur de la partie ancienne (B) (Auteur, 2021).	72
Figure 3.22 : La contribution du climatiseur dans la résolution du problème de chaleur dans la partie nouvelle (A) et la partie ancienne (B) (Auteur, 2021).....	72
Figure 3.23 : Jugement de la température au sein des bureaux de la partie nouvelle (A) et la partie ancienne (B) (Auteur, 2021).	73
Figure 3.24 : Solution pour résoudre le problème du froid dans la partie nouvelle (A) et la partie ancienne (B) (Auteur, 2021).	73
Figure 3.25 : Les horaires de recours à la solution au froid la partie nouvelle (A) (Auteur, 2021).	74
Figure 3.26 : La contribution du chauffage dans la résolution du problème de froid dans la partie nouvelle (A) et la partie ancienne (B) (Auteur, 2021).....	75
Figure 3.27 : L'humidité dans partie nouvelle (A) et la partie ancienne (B) (Auteur, 2021)	75
Figure 4.1 : Étape 01 de la simulation énergétique (Auteur, 2021).	78
Figure 4.2 : Étape 02 de la simulation énergétique (Auteur, 2021).	79
Figure 4.3 : Étape 03 de la simulation énergétique (Auteur, 2021).	79
Figure 4.4 : Étape 04 de la simulation énergétique (Auteur, 2021).....	80
Figure 4.5 : Données de météo de températures de la ville de Bejaïa (Auteur, 2021).....	81
Figure 4.6 : Déperditions thermique de l'enveloppe du bloc administratif (Auteur, 2021)...	82
Figure 4.7 : Besoins énergétiques du bloc administratif (Auteur, 2021).....	82
Figure 4.8 : Optimisation avec ajout d'ITI (Auteur, 2021).....	83
Figure 4.9 : Optimisation avec ajout d'ITE (Auteur, 2021).....	84
Figure 4.10 : Les besoins énergétique du bâtiment après l'optimisation avec ajout d'ITI (Auteur, 2021)	85
Figure 4.11 : Les besoins énergétique du bâtiment après l'optimisation avec ajout d'ITE (Auteur, 2021)	85

NOMENCLATURE

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

CIME Comité Intersectoriel de la Maitrise de l'Énergie

CO2 Dioxyde de carbone

DALY Année de vie perdue en bonne sante

DTR Documents techniques réglementaires

GMST Température moyenne de la surface de surface mondiale

ITE Isolation thermique par l'extérieur

ITI Isolation thermique par l'intérieur

N2O Oxyde nitreux

ODD Objectif de développement durable

OMM L'organisation météorologique mondial

PDF Part d'espèces potentiellement disparus

Ppm Parties par millions

PPD Pourcentage prévisible d'insatisfait

TFEC Consommation totale d'énergie finale

WPE Le forum économique mondiale

CHAPITRE INTRODUCTIF

1. Introduction générale :

La conception architecturale vise essentiellement une optimisation de solutions à des objectifs variés ; passant par la création d'espaces qui répondent au fonctionnement prévu d'un bâtiment, à la création d'un produit esthétique, jusqu'à maximiser la performance et l'efficacité énergétique du bâtiment dont l'intérêt national et international a fortement progressé de nos jours. Et ce, pour la lutte contre le changement climatique et la protection de l'environnement.

Les indicateurs d'impacts du changement climatique sont ponctuellement actualisés et indiqués par le GIEC (Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat) (Stocker, 2013). Il est défini à deux niveaux à différentes échelles d'impact les indicateurs qui expriment les dommages sur la santé humaine et l'environnement naturel. Au niveau midpoint sont définis les indicateurs de court terme tel que la concentration des émissions de gaz dans l'atmosphère, le forçage radiatif qui influent directement sur la température menant vers une météo extrême, et sur la précipitation menant vers la sécheresse. Au niveau endpoint sont définis les indicateurs de long et court terme tels que la perte de biodiversité, les feux de forêts qui sont des effets agissant sur les écosystèmes, ainsi des effets agissant sur l'humain, on cite parmi eux la malnutrition et les maladies infectieuses comme la malaria et la dengue...etc. (Bulle et al., 2019).

L'environnement naturel et la santé humaine ainsi que les ressources naturelles représentent donc des aires de protections que les différents indicateurs ont contribué à leurs dommages tel que les années de vies perdues en bonne santé (DALY), les espèces potentiellement disparus (PDF), et les ressources naturelles définitivement épuisées. (Frossard, 2020). Il est donc essentiel de mettre en œuvre un système pour réduire la consommation d'énergie.

La rénovation énergétique des bâtiments est une étape élémentaire pour une stratégie de transition énergétique. Cet objectif requiert une accélération du rythme des rénovations thermiques, afin de mieux bénéficier de ce potentiel d'économies d'énergies. (Rüdinger, 2013)

En effet, le bâtiment est le secteur le plus consommateur d'énergie, « *Les secteurs résidentiels et tertiaires en Algérie consomment environ 34% de la production d'énergie totale du pays* » (Seddiki et al., 2016). Dans le même sens, « *Les bâtiments résidentiels et non résidentiels représentent le secteur d'utilisation finale le plus important et constituent un objectif clé en termes d'efficacité énergétique. À l'échelle mondiale, la consommation*

énergétique finale des bâtiments a augmenté d'environ 1 % par an depuis 2005 et de 3 % par an pour l'électricité » (WCE & l'ADEM, 2013)

Ajoutant à cela que « *la construction neuve ne constitue que 1% du patrimoine existant* » (Lefèvre, 2012). C'est dans ce secteur que la prise en compte du développement durable est la plus évidente. Une façon qui semble la plus rapide pour la transformation de cette consommation : par la rénovation thermique massive des constructions anciennes. Cela permettra une réduction des déperditions de chaleur et donc l'amélioration du confort ainsi que la diminution de la facture énergétique, et par conséquent, la protection de l'environnement (Lefèvre, 2012).

Beaucoup de chercheurs ont menés des recherches sur l'épaisseur optimale de l'isolation thermique des murs extérieurs pour minimiser la consommation énergétique et améliorer les performances thermiques sans prendre en compte l'impact de la composition des parois.

2. Problématique :

Il est fréquent d'entendre des occupants d'un bâtiment s'exprimer de manière péjorative vis-à-vis du confort hygrothermique et de l'ambiance, en répétant « il fait froid », « il fait chaud », ou alors « je paie des factures très élevées de chauffage ou de climatisation ». Ces jugements négatifs sont la cause des conditions climatiques de l'environnement actuelle ainsi que la mauvaise performance du bâtiment et impose la nécessité d'agir dans les plus brefs délais. Une question fondamentale s'impose :

Comment rénover thermiquement un bâtiment pour atteindre une efficacité énergétique ?

3. Hypothèses :

Pour répondre à cette question, nous avons déduits les hypothèses suivantes : **la composition des parois extérieures est un facteur influent sur le confort thermique et énergétique de la construction.**

4. Analyse conceptuelle :

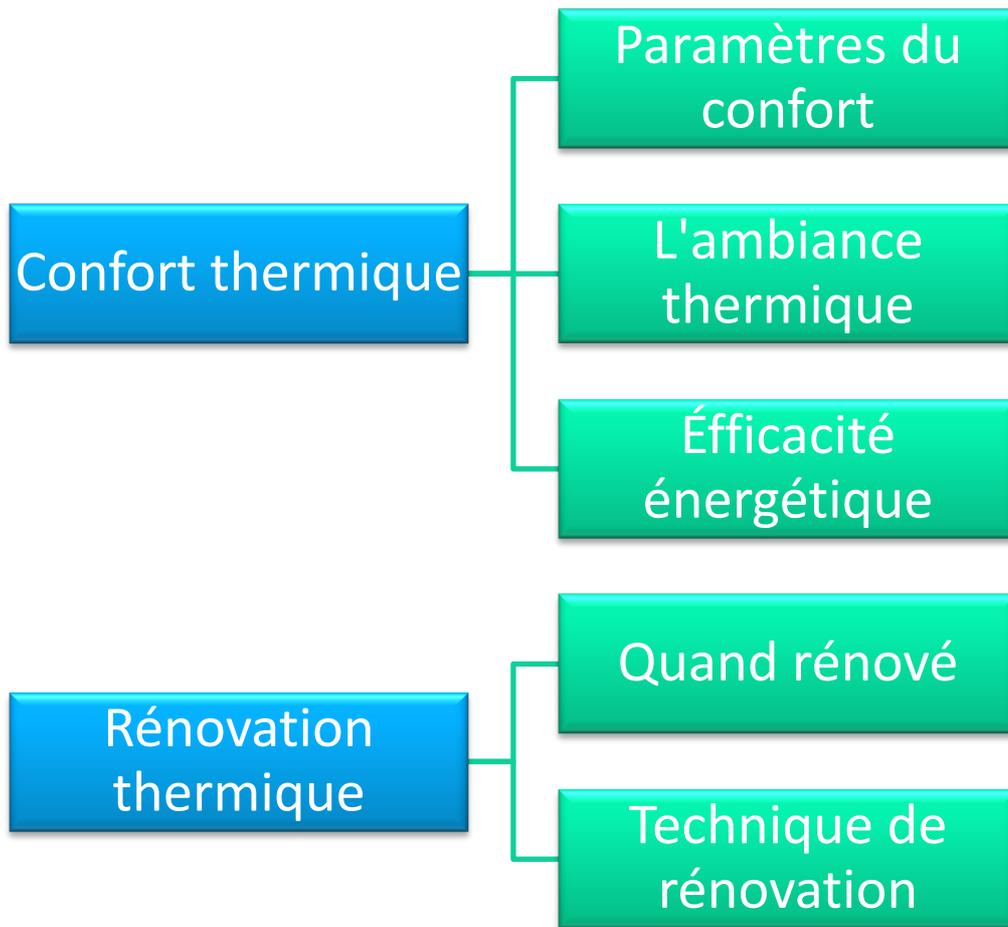


Figure 1.1 : Schéma explicatif de la structure du mémoire (Source : Auteur, 2021)

5. Contexte et objectif :

Le cas d'étude sera ici des bâtiments avec une composition de parois différentes et d'une chronologie différentes de la ville de Bejaïa qui profite d'un climat méditerranéen, généralement humide avec un léger changement de température saisonnier. L'objectif de cette recherche est de minimiser la consommation énergétique dans les bâtiments existant afin de protéger l'environnement en premier lieu, et maximiser le confort humain dans son habitation avec une facture la moins élevée que possible.

6. Méthodologie :

Pour vérifier les hypothèses citées plus haut, nous allons effectuer une étude bibliographique sur la rénovation thermique des bâtiments ainsi que leur performance énergétique.

Puis nous opterons pour une méthode empirique qualitative et quantitative pour faire l'objet d'une étude de plusieurs cas d'études, par la suite un modèle numérique à travers le logiciel *ENERGIEplus* pour modéliser les bâtiments et analyser leur performance énergétique. Les résultats fournissent des indications sur la modernisation éco-énergétique de l'enveloppe.

CHAPITRE I

LE CONFORT THERMIQUE

Introduction

Dans ce chapitre nous allons effectuer un état de l'art sur les connaissances existantes en ce qui concerne le confort thermique. Ceci nous permettra d'analyser et préciser les différents besoins de l'humain en matière de confort thermique. Sont détaillés les différentes variables et caractéristiques physique, psychologique et physiologique ainsi que leur rôle dans la perception thermique de l'environnement par l'être humain.

I.1 La pluridisciplinarité du confort thermique :

Individuels Dans les milieux bâtis, il est nécessaire d'apporter des réponses aux exigences du confort thermique pour protéger les occupants du climat extérieur.

Face à un environnement thermique, une réaction dynamique du corps humain s'impose, volontaire ou involontaire, pour satisfaire les exigences du confort thermique. Le corps, dépendant des conditions thermiques de son environnement, s'il ne connaît pas une sensation de neutralité thermique, il éprouvera une sensation de tiédeur ou de fraîcheur thermique, ou alors de chaud ou de froid dans des conditions extrêmes. Le corps se trouvera ici dans une zone d'inconfort thermique (Candas, 1998 ; MOUJALLED, 2007).

L'étude du confort thermique doit considérer les différents grandeurs l'environnement, ainsi que les paramètres des échanges thermiques entre l'homme de l'environnement. L'étude doit considérer aussi tous les aspects physiologiques, psychologiques et sociologiques. Toutes ces variables interagissent entre eux et influencent la perception thermique de l'individu face à son environnement, mais aussi son comportement, son passé histoire thermique et pratiques, techniques et culturelles (Lavigne, Brejon, & Fernandez, 1994).

I.2 L'aspect physiologique :

Le maintien du fonctionnement du corps humain nécessite une permanente dépense énergétique qui se propage sous forme de chaleur vers l'extérieur de l'organisme soit par les mécanismes de contrôle involontaires (par exemple la circulation du sang, la respiration), ou des mécanismes de contrôle volontaire (par exemple l'activité, le taux d'habillement). Ceci pour maintenir une température presque constante (entre 36,5 et 37,5 °C) à l'intérieur du corps humain. Au-delà du type d'activité, le sexe et l'âge, et d'autres caractéristiques de l'individu contribuent eux aussi à la détermination du taux d'émission de chaleur (Sedira, 2020) qui agissent seulement sur la température interne du corps. La température extérieure du corps quant à

elle, dépend des caractéristiques de l'environnement extérieurs (par exemple la température d'air, l'habillement, vitesse d'air) (Moujalled, 2007).

Le tableau ci-dessous indique la chaleur métabolique, en Watt et en uni té met, selon différents degrés d'activités pour un adulte normal d'âge moyen (Grundströme *et al.*, 2003).

Tableau 1.1 : Chaleur métabolique selon différentes activités (ASHRAE, 1997) (Grundströme *et al.*, 2003).

Activités	Chaleur métabolique	
	W	Met
Dormant	75	0,7
Au repos, assis	110	1,0
Au bureau	110-145	1,0-1,4
Marche lente	135-180	1,3-1,7
Ménage	210-360	2,0-3,4
Marche rapide	270-395	2,6-3,8
Travaux manuels	425-505	4,0-4,8

Le niveau d'activité mesuré en "met", les valeurs caractéristiques de l'activité métabolique des individus ont été fournies dans le tableau 1.1 :

Sachant que $1\text{met} = 58,2\text{ w/m}^2$ et que 115w pour une personne moyenne, un environnement frais facilitera la dissipation de chaleur.

De nature homéotherme, l'homme peut contrôler les échanges de chaleurs de son corps grâce à un système de thermorégulation dont on distingue deux types (Parsons, 2003).

I.2.1 La thermorégulation végétative

Ce système assure une régulation dynamique de la température intérieure maintenue à l'alentour de 37°C , et la température cutanée maintenue en conditions standard près de 34°C Hammel et al. Proposent un modèle de fonctionnement des structures centrales. La température corporelle interne et cutané sont comparés à une température de consigne fixe, puis ajustés avec un signal d'erreur proportionnel aux écarts de réglage détectés. Les réponses

thermorégulatoires aux écarts de température s'activent suite à cette commande centrale (BACH et al., 2010).

Le système de thermorégulation est ainsi décomposé en trois parties : les thermorécepteurs, le contrôleur et les actionneurs (CANDAS, 1998 ; THELLIER, 1989 ; MOUJALLED, 2007).

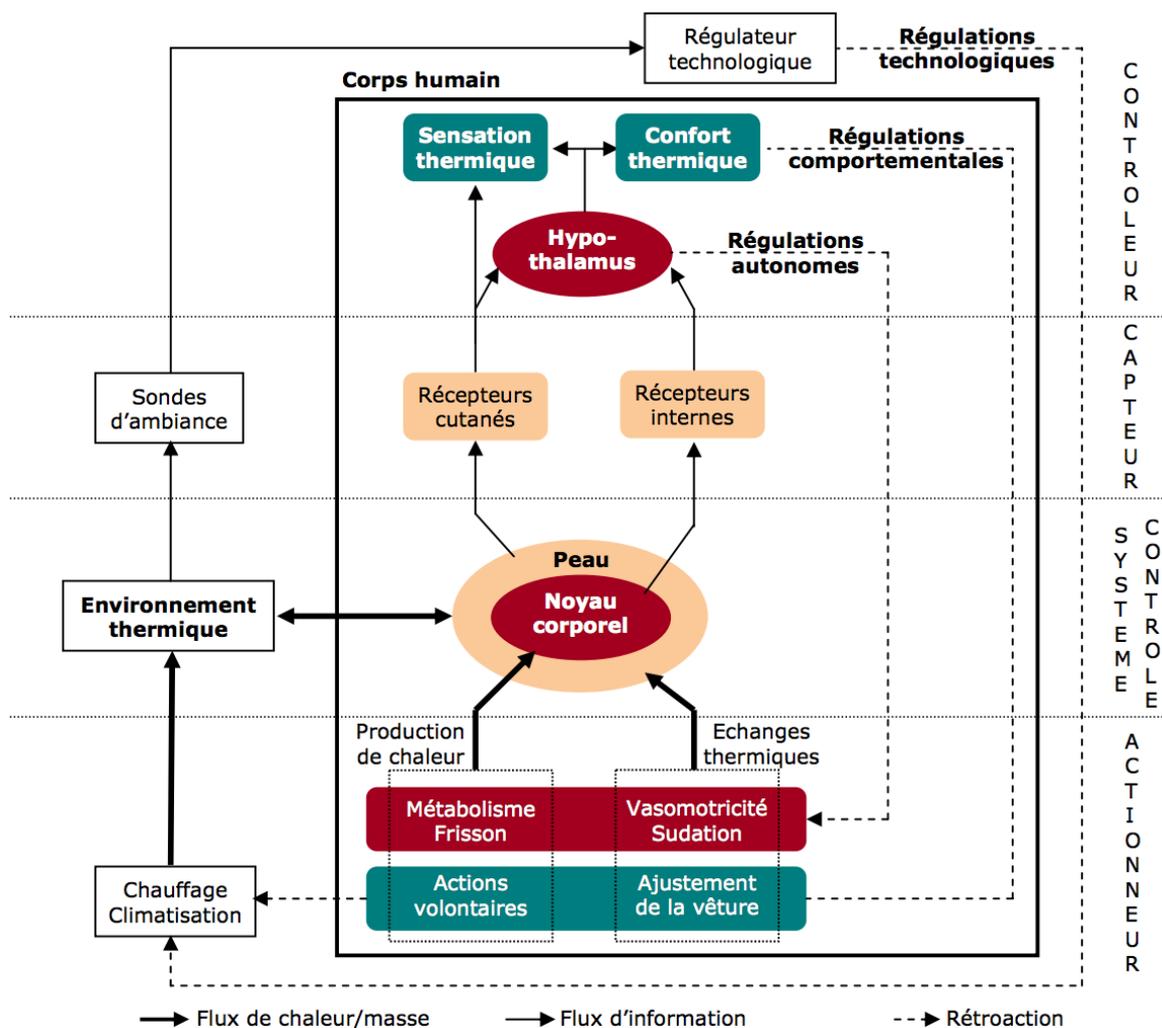


Figure 1.2 : Principe de la thermorégulation végétative, technologique et comportementale (Source : MOUJALLED, 2007).

- Les thermorécepteurs, détecteurs chaud et détecteurs de froid, se trouvent à l'intérieur de la peau. Ils informent le système de régulation de la présence de variation de température en envoyant des fréquences proportionnelles à cette variation.

- Le corps se réchauffe dans le cas où le signal d'écart est positif, et les mécanismes qui lutte contre le chaud se mettent en œuvre. Dans le cas inverse, ou le signal est négatif, les mécanismes qui lutte contre le froid se déclenche.
- Les actionneurs peuvent être de différentes natures, par exemple la vasomotricité qui est le changement de diamètre des vaisseaux sanguins, et ce pour permettre la diminution du débit sanguin qui va vers la peau face au froid (vasoconstriction), ou l'augmentation du débit sanguin face au chaud (vasodilatation) (Moujalled, 2007).

I.2.2 La thermorégulation comportementale

L'adaptation comportementale de l'homme dans son environnement affecte considérablement son état thermique et lutte contre le chaud et le froid (figure 1.3).

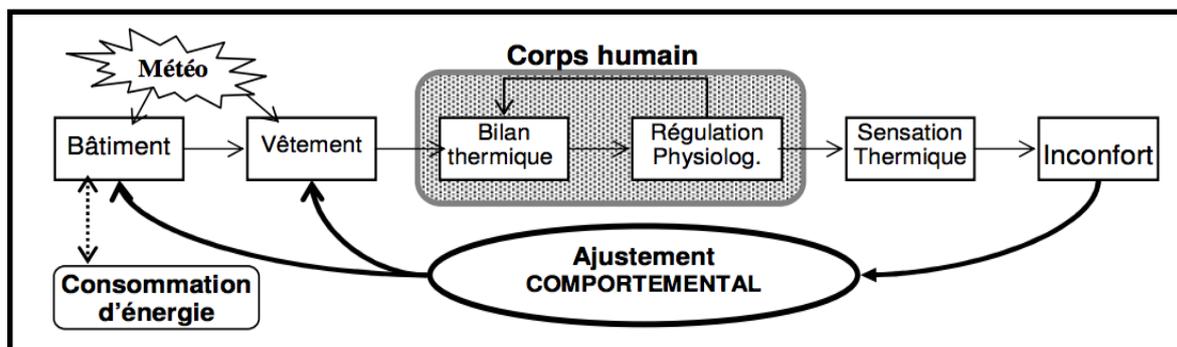


Figure 1.3 : Rétroaction de l'ajustement comportemental (Source : Thellier, 2007 ; Richard, 1998).

Ces comportements peuvent être personnelles (modification de posture, d'habillement...) ou technologique (ouverture ou fermeture des fenêtres...) ou culturels (faire une sieste...) tout dépend des possibilités et des opportunités (Richard, 1998).

Le tableau 2 montre les valeurs en clo (exprime la résistance à la chaleur de l'habillement tel que 1 clo = 0,155 m². K/W) pour différents vêtements.

Tableau 1.2 : Valeurs clo pour différents vêtements (Source : ASHRAE, 1997 ; Grundströme *et al.*, 2003)

<i>Vêtement</i>	Isolation (clo)
<i>Short, chemise manche courte</i>	0,4
<i>Pantalon, chemise</i>	0,6
<i>Comme ci-dessus, plus veste</i>	1,0
<i>Costume laine, gilet, chemise manches longues</i>	1,5
<i>Jupe/robe, chemisier, collant</i>	0,5-0,7
<i>Comme ci-dessus plus pull laine manches longues</i>	1,1
<i>Vêtement chaud plus manteau laine</i>	2,0-2,5

I.3. L'aspect physique :

Entes l'aspect physique implique tous les transferts de chaleur entre l'homme et son environnement. Ces transferts s'effectuent selon les lois de la physique (convection, conduction, rayonnement) (Nicol, 1993).

I.3.1. Les modes de transfert de chaleurs

Le mode de transfert principale dans le bâtiment est le transfert par conduction thermique. Cependant, il faut noter que la chaleur peut se transmettre par déplacement de l'air (transfert par convection), ou alors par rayonnement (par rayons de soleil passant à travers les fenêtres par exemple). (Jean Louis & Franck, 2017)

- **La convection :**

C'est l'échange de chaleur qui se produit entre le corps et l'air qui l'entoure lors d'une différence entre la température de la surface exposé de l'humain et l'air. Si l'air est le plus chaud, il en résulte un réchauffement du corps et un refroidissement de l'air. Quand l'air est le plus froid, il en résulte un refroidissement du corps et un réchauffement de l'air (Nicol, 1993).

- **Le rayonnement :**

Lors d'une exposition au soleil, les rayons absorbés par la surface exposé de l'humain se transforment en chaleur. Cette dernière s'échange entre l'humain et les parois qui l'entoure.

Le corps se réchauffe lorsque le flux radiatif qu'il reçoit est supérieur à sa propre émission. Dans le cas inverse, le corps se refroidit (Roussel, 2017).

Le rayonnement est calculé par l'expression :

$$R = h_r \times F_{cl} (T_r - T_{sk})$$

Tel que :

h_r : coefficient de transfert de chaleur par rayonnement

T_r : température moyenne de rayonnement de l'environnement ($^{\circ}C$)

I.3.2. L'influence des vêtements

Les vêtements représentent une couche isolante et accroît la température du corps. Ils créent un microclimat en agissant sur les échanges de chaleur entre la peau et l'environnement. Ce transfert s'effectue par conduction au tissu, par convection, évaporation et rayonnement avec l'environnement (Rakoto, 2012).

La résistance thermique est l'isolement entre la surface des habilles et la peau. Le clo est l'unité qui exprime cet isolement tel que ($1 \text{ clo} = 0,155 \text{ m}^2 \cdot ^{\circ}C/W$). La résistance à l'évaporation peut être définie par la résistance thermique d'un vêtement et ses propriétés de perméabilité à la vapeur (Parsons, 2003).

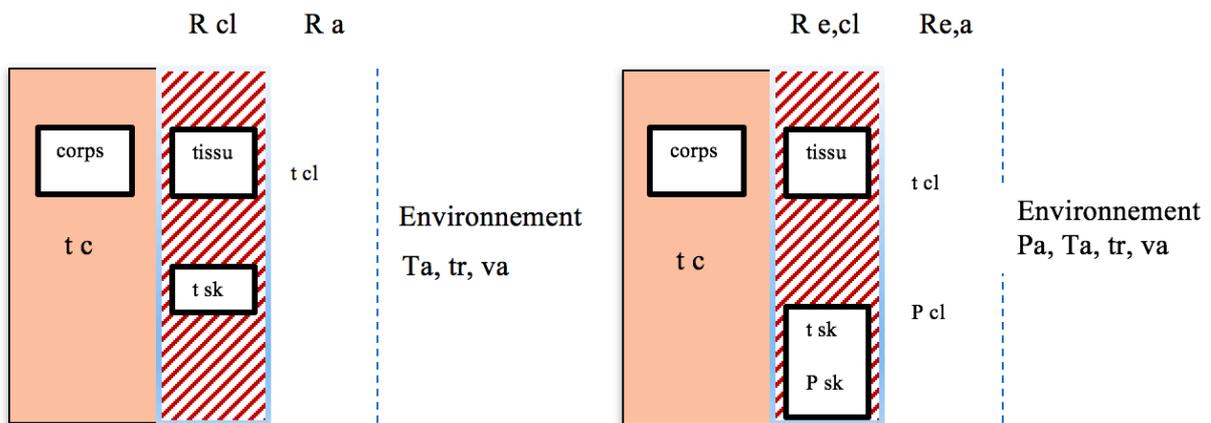


Figure 1.4 : Modèles du comportement thermique des vêtements. (À gauche le modèle à un seul paramètre : l'isolement thermique et à droite le modèle à deux paramètres : l'isolement thermique et la résistance à l'évaporation) (Source : Parsons, 2003).

À part ces deux paramètres de résistance, différents autres phénomènes tels que les effets tampon, la ventilation, le type d'activité, la nature du tissu (Rakoto, 2012).

La chaleur produite par le corps humain se propage dans l'environnement par la voie respiratoire et à travers la surface de la peau, par les trois mécanismes de transferts de chaleur (conduction, convection, rayonnement) ainsi que par évaporation. Ces phénomènes ont un impact sur le bilan thermique du corps (Rakoto, 2012).

I.4. L'aspect psychologique :

La sensation thermique est de manière générale liée à des paramètres en relation avec l'occupant (par exemple l'âge, le sexe, la culture, le comportement, l'expérience). Cette sensation est liée aux informations données sur l'état thermique de l'occupant à travers les thermorécepteurs (Narcon, 2001) (Moujalled, 2007).

La perception sensorielle du climat et de l'ambiance dépend des préférences ; deux occupants venant de différents environnements thermiques auront certainement de différents jugements sur l'ambiance d'un même autre environnement (Moujalled, 2007). Plusieurs travaux de recherche ont démontré que la sensation thermique dépend de la température cutanée (Parsons, 2003).

Il est important de préciser que l'équilibre thermique est assuré par les mécanismes de thermorégulations dans une vaste zone de conditions d'ambiance, contrairement à la neutralité thermique ressentis dans une zone plus rétrécie (Moujalled, 2007).

Tableau 1.3 : Les échelles de la sensation thermique selon l'ASHRAE

L'échelle de l'ASHRAE	
7 (+3)	Très chaud
6 (+2)	Chaud
5 (+1)	Légèrement chaud
4 (0)	Neutre
3 (-1)	Légèrement froid
2 (-2)	Froid
1 (-3)	Très froid

L'environnement d'un certain sujet, son humeur, ses expériences thermiques sont tous des aspects psychologiques qui influent sa perception thermique et son ambiance (Berger, 1995).

Les attentes des personnes peuvent être en accord avec leurs habitudes, leurs différentes expériences thermiques et culturel ainsi que leurs caractéristiques physiologiques (Richard, 1998).

Le schéma présent dans la figure 1.5 présente la relation d'un individu avec son environnement (Berger, 1995).

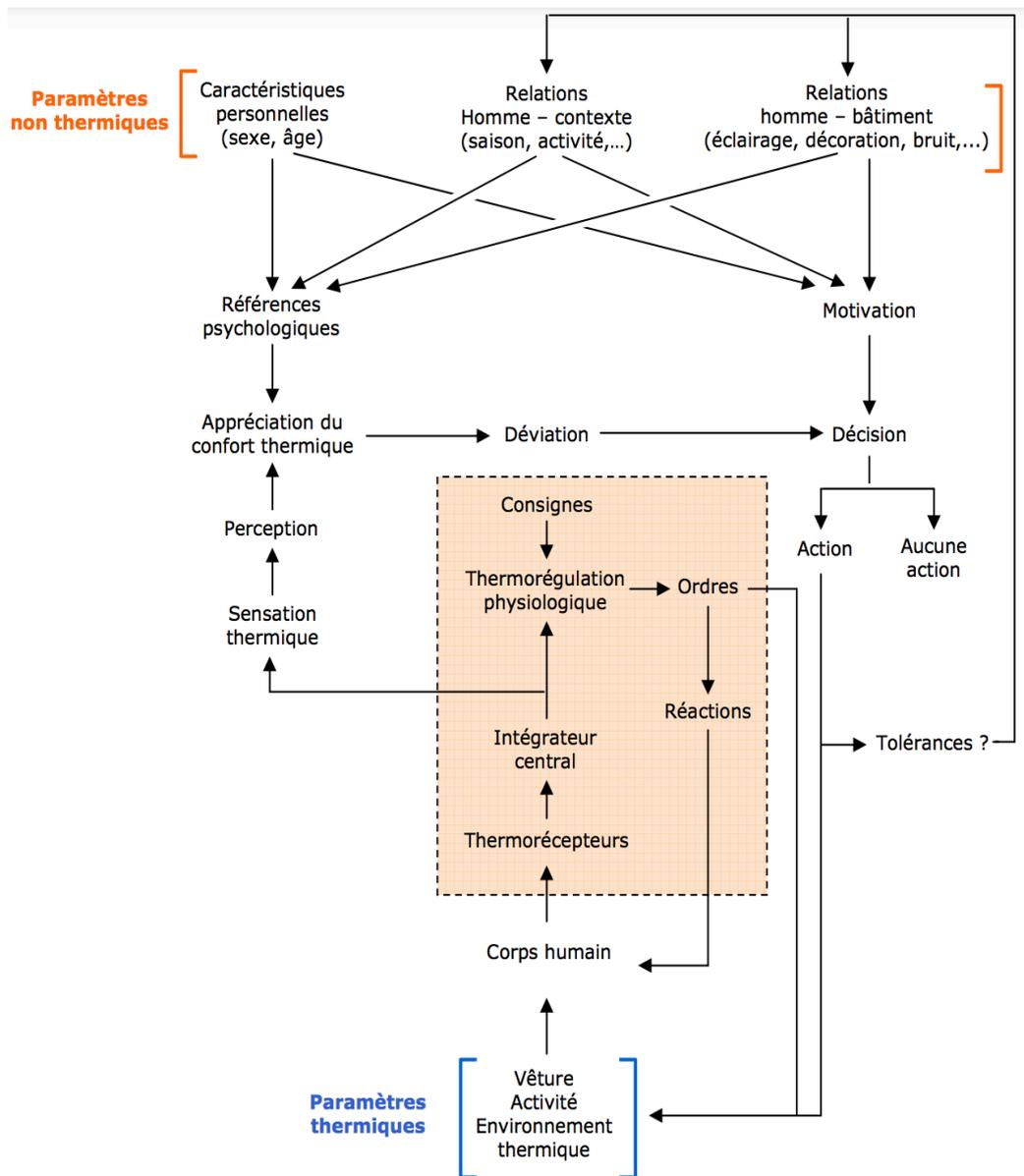


Figure 1.5 : La relation globale entre une personne et son environnement (Source : Berger, 1995).

Selon Moujalled « *Compte tenu de l'aspect subjectif du confort thermique apparaissant comme un jugement affectif, son évaluation nécessite l'utilisation de trois échelles essentielles*

: l'une relative à la sensation, l'autre à l'agrément, et la troisième à la préférence ». C'est pour cela qu'il est considéré comme un processus adaptatif dynamique, et qu'il ne peut être défini dans l'absolu.

I.5. Paramètres météorologiques influents sur le confort thermique

Plusieurs paramètres météorologiques sont à l'origine du confort ou de l'inconfort thermique au sein d'un bâtiment. Ces derniers sont développés ci-dessous.

I.5.1. Température de l'air

Pour déterminer le degré de confort thermique d'un environnement, un facteur primordial est la température de l'air, mesuré par un thermomètre à bulbe. Les rayons solaires, la pression atmosphérique et la teneur en eau sont les facteurs majeurs qui influent la température de l'air (Rakoto, 2012). La valeur de température qui correspond au confort se trouve entre 18 et 25 °C.

La figure ci-dessous illustre les températures qui conviennent au confort thermique des personnes qui effectuent un travail léger ou en position assise.

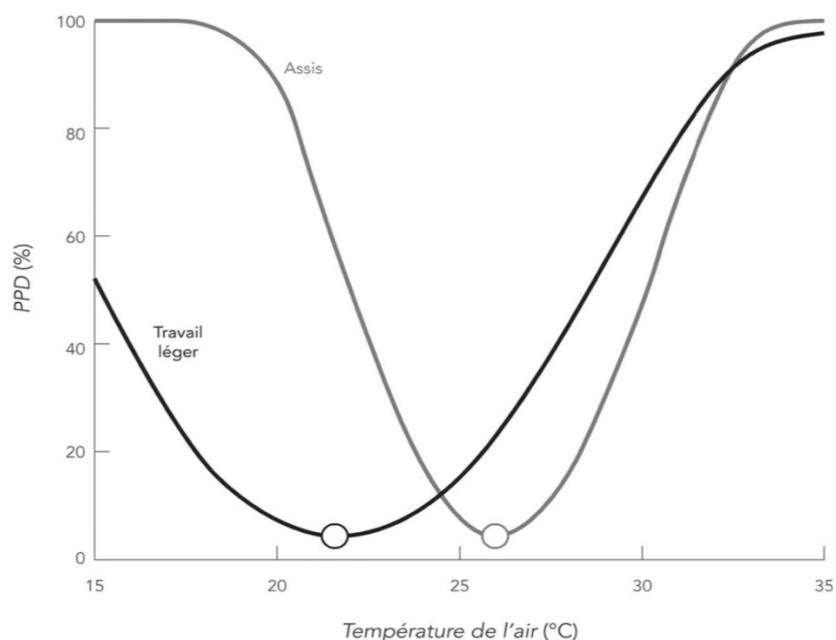


Figure 1.6 : PPD des personnes au repos et des personnes en travail léger (Benjeddou & Jedidi, 2016)

En tenant compte qu'il n'est pas possible de définir la température qui procure de la commodité chez tous les individus, on constate que les personnes au repos ressentent rapidement le changement de températures et sont en état de confort à une température de 26°C. Les personnes effectuant un travail léger préfèrent les températures plus basses car ils ont plus de chaleur à dégagé. (Benjeddou & Jedidi, 2016).

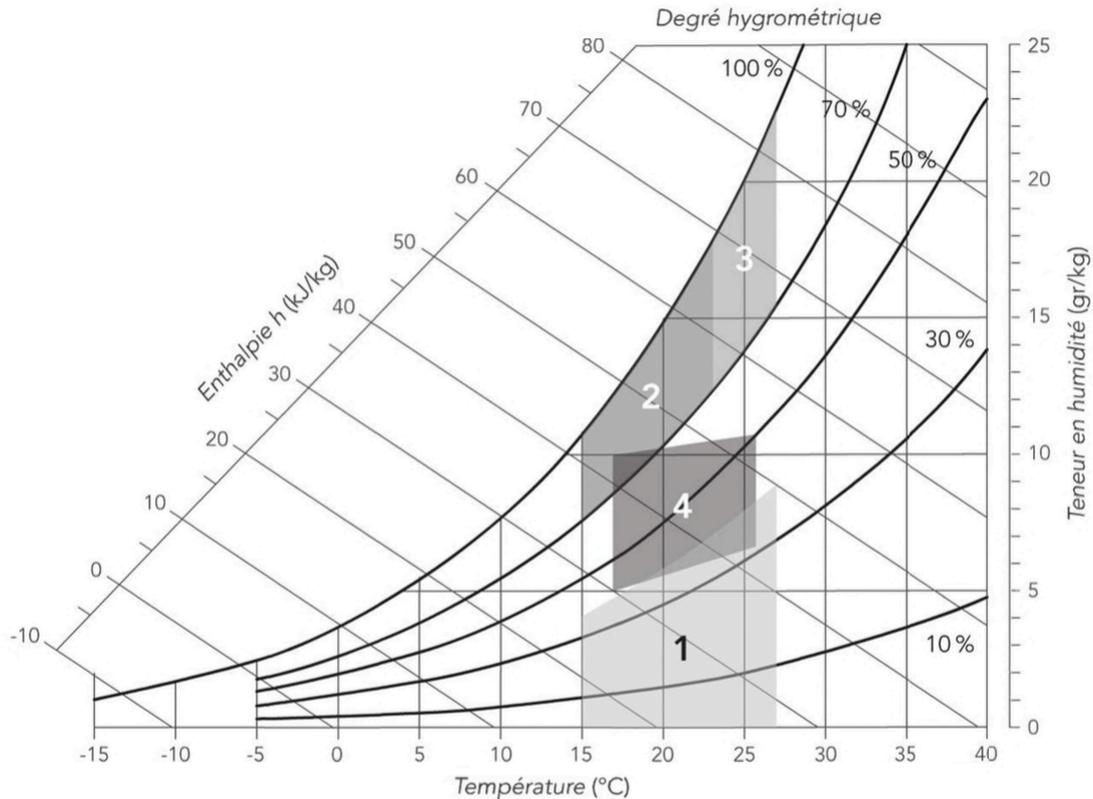
Il est impératif de combiner entre la température de l'air et les différents paramètres du climat pour avoir un résultat le plus correcte possible (Holger, 2002).

I.5.2. Humidité relative de l'air

L'humidité relative de l'air est manifestée par la pression de vapeur d'eau. Elle influence la capacité du corps à dégager l'excès de chaleur vers l'extérieur. (Rakoto, 2012).

Notre sensation de chaleur est directement liée au degré de l'humidité de l'ambiance où on se trouve ; pour une même température moyennement élevée (24°C par exemple), elle sera difficilement supportable dans des degrés d'humidité élevée (84% par exemple) car elle entraîne une impression de moiteur qui revient à la difficulté de la peau d'évaporer la transpiration pour se rafraichir. Alors que dans des degrés d'humidité faible (17% par exemple), la chaleur nous paraîtra très supportable. Les précipitations contribuent d'une manière significative à l'humidité. (Benjeddou & Jedidi, 2016)

La figure ci-dessous illustre les quatre zones de confort hygrothermiques.



- 1 : Zone à éviter vis-à-vis des problèmes de sécheresse.
- 2 et 3 : Zones à éviter vis-à-vis des développements de bactéries et de microchampignons.
- 3 : Zone à éviter vis-à-vis des développements d'acariens.
- 4 : Polygone de confort hygrothermique.

Figure 1.7 : Les plages de confort température-humidité (Benjeddou & Jedidi, 2016)

Le taux d'humidité relative recommandé pour une température d'air de 22°C est entre 40% et 65% tel que le montre la figure 1.7 (la zone de confort hygrothermique étant situé dans la zone 4) (Benjeddou & Jedidi, 2016).

I.5.3. Ensoleillement

En effet, le confort thermique dépend aussi de l'énergie absorbé et transmise à travers l'enveloppe des bâtiments. Et les radiations solaires sont la principale source de cette énergie. La température ambiante interne augmente immédiatement si ses radiations sont directement transmises au bâtiment. Il s'avère donc primordiale de minimiser l'exposition du bâtiment et protéger de manière efficace les surfaces exposées (Benjeddou & Jedidi, 2016).

I.5.4. Le vent

Le vent est caractérisé par sa direction, et sa vitesse moyenne, qui influent sur les échanges de chaleur par évaporation (transpiration) et par convection. L'impact de la vitesse de l'air a tendance à être négligeable à l'intérieur d'un bâtiment ne dépassant pas 0,2 m/s. Plus le degré d'activité d'un individu est plus intense et plus la vitesse de l'air qui permet une sensation de confort augmente. L'effet rafraichissant peut-être obtenue au moyen de ventilation ou alors en diminuant la température de l'air. C'est donc un paramètre à prendre en considération dans la conception architecturale, ayant un impact sur le besoin énergétique du bâtiment. (Benjeddou & Jedidi, 2016)

I.6. L'efficacité énergétique ; une problématique mondiale :

Un rapport annuel est effectué sur les progrès de l'énergie pour orienter les pays à élaborer les politiques convenables et un accès durable à l'énergie, conjoint des agences dépositaires de l'ODD, objectif de développement durable. Le rapport examine l'objectif de développer les énergies renouvelables. Ces derniers se sont montrés les plus résistants des énergies et aident à la baisse des coûts technologiques grâce à des politiques de soutien. (IRENA, 2021)

Globalement, les énergies renouvelables connaissent un développement jamais connus auparavant, même plus vite que les prévisions effectuer sur une base annuelle. En revanche, Le pourcentage de la consommation d'énergies renouvelables ne connaît pas de grand changement (IEA, IRENA, UNSD, Bank, & WHO, 2021); il est de 17% depuis 2010, parmi la consommation totale d'énergie finale (TFEC) car les deux consommations ont augmenté au même rythme. C'est pour cela que le développement davantage d'énergies renouvelables, et l'élimination progressive des fossiles combustibles s'avère très important. Ainsi, il est primordial de se pencher vers l'efficacité énergétique pour limiter la consommation totale d'énergie. (REN21, 2020)

Tout bien considéré, la planète n'est évidemment pas sur la bonne voie, et il est nécessaire d'effectuer des efforts considérables pour atteindre l'ODD 7 qui comprend 4 cibles énergétiques phares (IRENA, 2021) :

- *7.1 : Assurer l'accès universel à l'électricité et à des solutions de cuisson propre*

- 7.2 : Augmenter sensiblement la part des énergies renouvelables
- 7.3 : Doubler les progrès en matière d'efficacité énergétique
- 7.A : Accroître la collaboration internationale en faveur des énergies propres et renouvelables. » (IRENA, 2021)

Les villes sont des agents importants dans la conduite locale de l'utilisation des énergies renouvelables, en mettant en place des mesures qui comble les politiques au niveau national. Ils sont ordinairement motivés à promouvoir les énergies renouvelables en plus des approvisionnements énergétiques. (Voir figure X). Le coût et l'accès aux énergies renouvelables présentent des considérations critiques. S'intéresser au domaine des énergies renouvelables peut promouvoir un développement de l'économie et créer des emplois. Les villes se doivent aussi de tenir compte de l'équité sociale, et ainsi, veiller à ce que les plus pauvres des populations aient accès au moins à un type d'énergie renouvelables, mais aussi réduire la pauvreté. Les impacts sur le climat prennent de plus en plus de l'ampleur, impliquant des problèmes de santé, la pollution atmosphérique qui revient à l'utilisation de combustibles fossiles, et donc la volonté d'assurer une qualité de vie élevé. (IRENA, 2021)

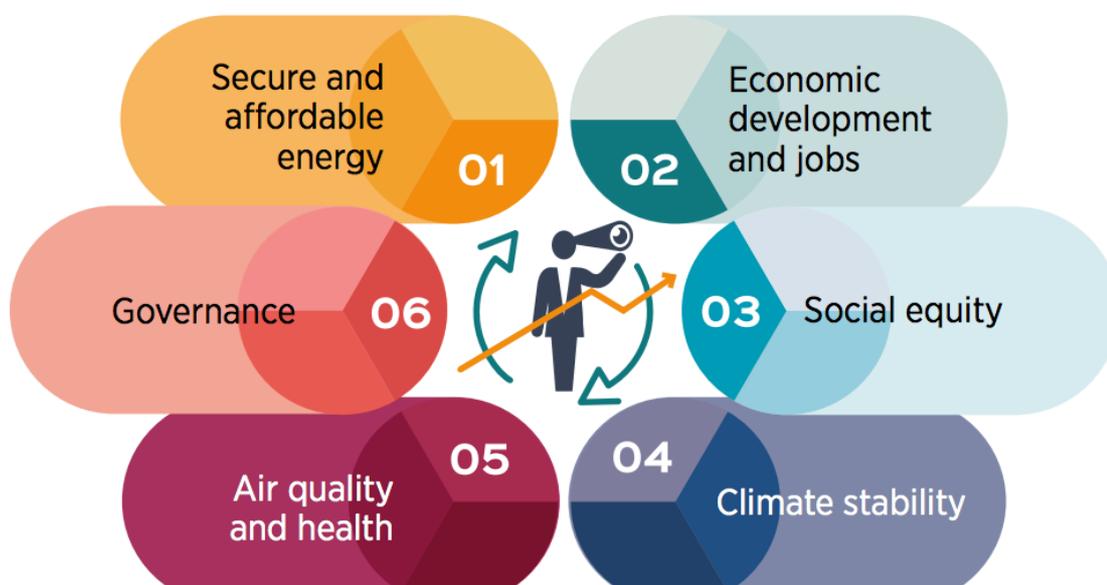


Figure 1.8 : Motivations pour la prise de décision municipale à propos de l'énergie.
(IRENA, 2021)

Depuis le XIXème siècle s'accumulent des résultats scientifiques sur le changement climatique, et on apprend pour la première fois sur l'effet de serre par le physicien et

mathématicien Jean-Baptiste Joseph Fourier en 1824. En 2010, l'Académie des sciences confirme les thèses du réchauffement climatique et le danger qu'il procure. (Catellani, 2021) En 2013, le forum économique mondiale (WPE), à travers son analyse, identifie 50 risques mondiaux. (Treen, Williams, & O'Neill, 2020)

« Le rapport annuel de l'OMM sur l'état du climat mondial en 2020 rassemble des données sur les indicateurs du système climatique, notamment les concentrations de gaz à effet de serre, l'augmentation des températures des terres émergées et des océans, l'élévation du niveau de la mer, la fonte des glaces et le recul des glaciers, ainsi que les phénomènes météorologiques extrêmes. Il met également en exergue les impacts de ces indicateurs sur le développement socio-économique, les migrations et les déplacements de population, la sécurité alimentaire et les écosystèmes terrestres et marins. » (organisation météorologique mondiale (OMM), 2019)

Mr Petteri Taalas, le nouveau Secrétaire général de l'Organisation météorologique mondiale exprime que le rapport lancé en vue du Sommet des dirigeants sur le climat montre qu'il n'y a plus de temps à perdre. Les répercussions deviennent de plus en plus coûteuses pour la planète et pour les populations, et il est temps que les pays s'engagent à atteindre des émissions nul d'ici 2050. (organisation météorologique mondiale (OMM), 2019)

I.6.1. Changement climatique

Depuis la 2^{ème} conférence avec les nations unies à propos des changements climatiques en 1996 à Genève, les experts confirment qu'au cours des trente dernières années, des catastrophes naturelles significatives se sont multipliés par quatre et qu'il faut vite prendre des mesures efficaces pour faire face à cela. Dans certaines régions de la planète, ces changements climatiques ont déjà procuré des conséquences dramatiques tel que des pénuries alimentaires, des épidémies, des déplacements de populations ... etc. (Dominique, 2001).

I.6.1.1. Gaz à effet de serre

Les concentrations atmosphériques de gaz à effet de serre revient aux activités humaines et jouent un rôle majeur dans le changement climatique (State of the Global Climate 2020, 2021) Si cette concentration continue a augmenté de la même manière que les années précédentes, les fractions molaires de dioxyde de carbone (CO₂), qui est le gaz le plus

fréquemment utilisé (et viennent après l'oxyde nitreux (N₂O) et le méthane (CH₄)) pourront atteindre 414 parties par millions (ppm) ou même plus en fin de 2021. (organisation météorologique mondiale (OMM), 2019)

Les graphes ci-dessous montre l'évolution des gaz à effet de serre depuis la période préindustrielle.

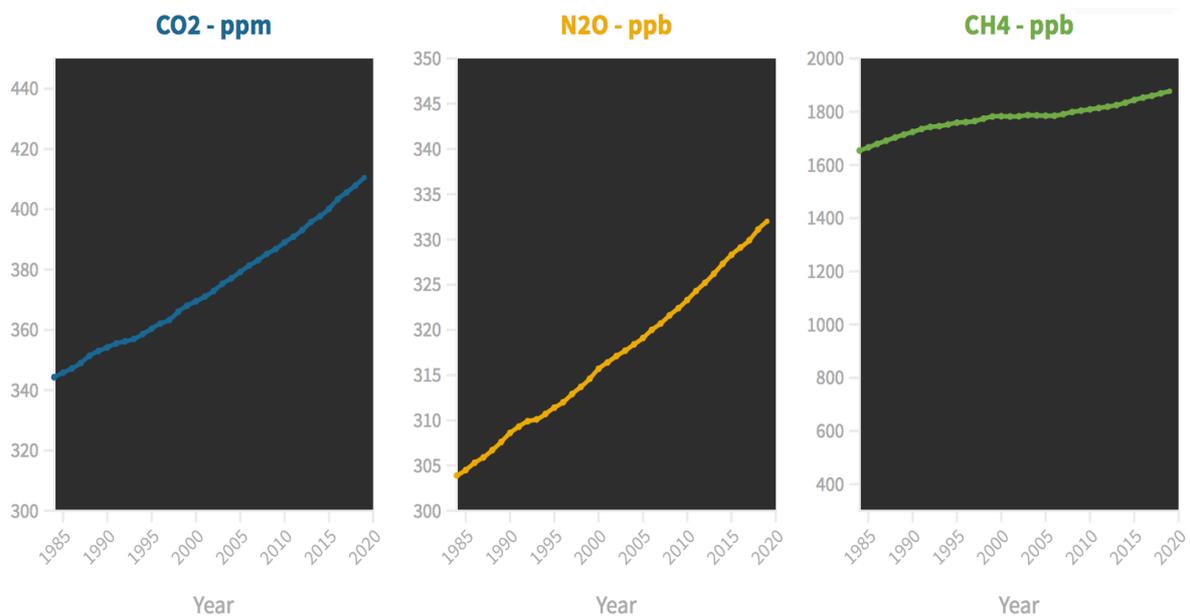


Figure 1.9 : Évolution des gaz à effet de serre depuis la période préindustrielle (State of the Global Climate 2020, 2021)

Au même rythme que les concentrations des gaz à effet de serre s'amplifient, ainsi, la température moyenne de surface mondiale (GMST) s'amplifie aussi (State of the Global Climate 2020, 2021).

I.6.1.2 Le réchauffement planétaire

Parmi les signaux les plus flagrant du changement climatique c'est le réchauffement planétaire, l'augmentation de la température moyenne mondiale. Le graphe ci-dessous montre l'évolution de la température à partir de la période préindustrielle. (organisation météorologique mondiale (OMM), 2019) En parallèle, on remarque la diminution de la glace de mer et les glaciers, ainsi que l'augmentation des températures du pergélisol, ce qui engendre des implications de grandes conséquences sur la population mondiale, les écosystèmes, les infrastructures... à travers différentes rétroactions (State of the Global Climate 2020, 2021).

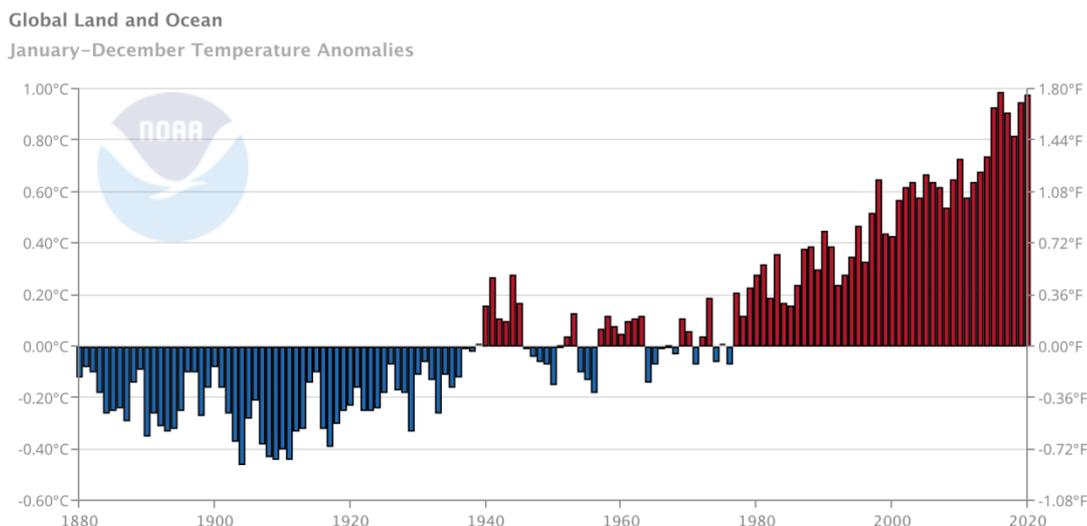


Figure 1.10 : Évolution de la température annuelle mondiale depuis la période préindustrielle (NOAA, national oceanic and atmospheric administration, National Centers for Environmental Information, 2021).

L'organisation météorologique mondial (OMM) constate que chaque décennie est plus chaude que celle qui la précède, un phénomène qui se produit à cause des gaz à effet de serre.

Tableau 1.4 : Évolution de la température par rapport aux années 1850-1900 (NOAA, national oceanic and atmospheric administration, National Centers for Environmental Information, 2021) (Adapté par l'auteur).

Année	1880	1980	2000	2010	2021
Anomalie de température	-0,12°C	0,28°C	0,43°C	0,73°C	0,98°C

I.6.2. Cadre mondial

Plusieurs secteurs représentent la source des émissions de gaz à effet de serre, notamment, on retrouve dans la figure ici-bas la répartition de la consommation d'énergie total final à son image finale ou on voit que la plus grande partie de l'énergie est consommée par le cadre thermique avec 51% de consommation finale, parmi laquelle seulement 10,1% font partie des énergies renouvelables (REN21, 2020).

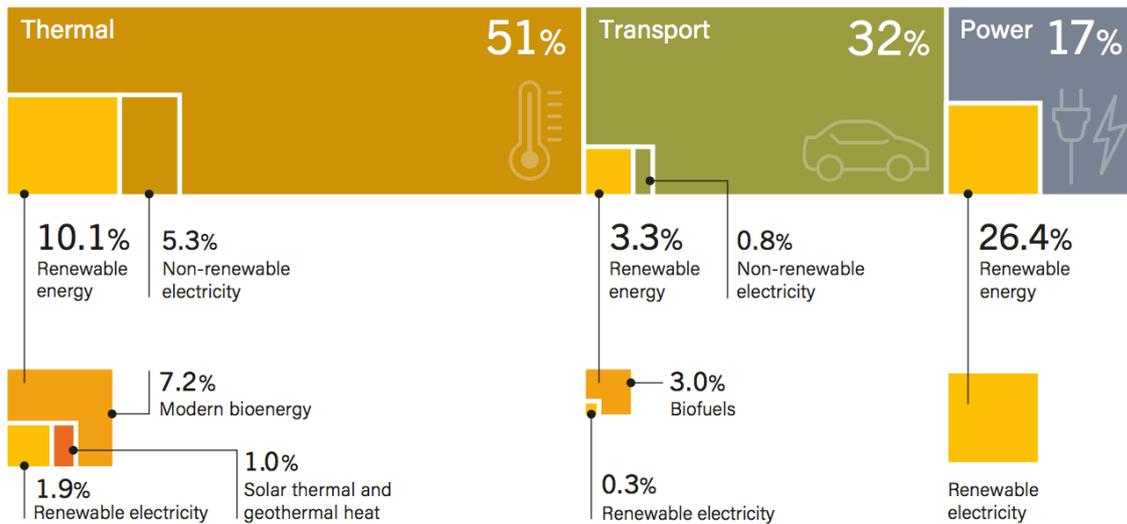


Figure 1.11 : La répartition de la consommation d'énergie total final à son image finale. (REN21, 2020).

La figure X nous communique la répartition des émissions de CO₂ dues à l'énergie au monde, où on remarque que la production d'électricité se trouve en première classe avec un pourcentage de 41%, puis le transport avec un pourcentage de 25%, et en troisième classe l'industrie et la construction qui représente 18% du totale d'émissions de gaz à effet de serre, un pourcentage non négligeable au niveau mondial (Hovsepyan, 2020).

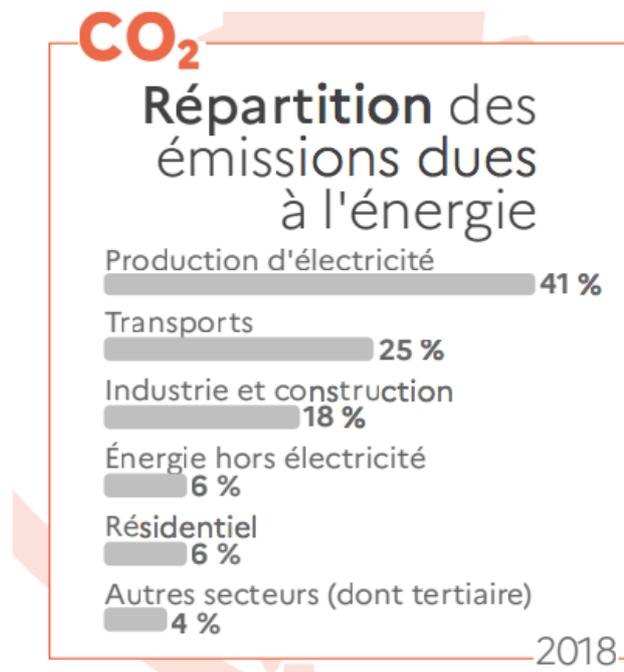


Figure 1.12 : Répartition des émissions de CO₂ dues à l'énergie au monde (Sédillot, 2021).

Le chauffage et la climatisation représente 77% de la demande énergétique mondiale en 2017 dans les bâtiments. Ce pourcentage augmente depuis 2010 de 0,6% par an, une augmentation assez lente. Bien que le pourcentage de l'énergie utilisé pour la climatisation qui est de 6% augmente très rapidement, à raison de 4% par an. Concernant l'électricité, le pourcentage augmente chaque année de 2% (23% en 2017) (REN21, 2020).

Globalement, l'énergie nécessaire pour le chauffage et la climatisation dépend fortement des combustibles fossiles. En 2018, la part des énergies renouvelables dans les besoins de chauffage et de climatisation étant de 10,1% contre 8% en 2017. Cette hausse était due en grande partie au développement de l'électricité renouvelable ainsi que du solaire thermique (REN21, 2020).

La figure ci-dessous exprime la répartition du pourcentage de l'utilisation de chaque énergie renouvelable et non renouvelable, dans le bâtiment.

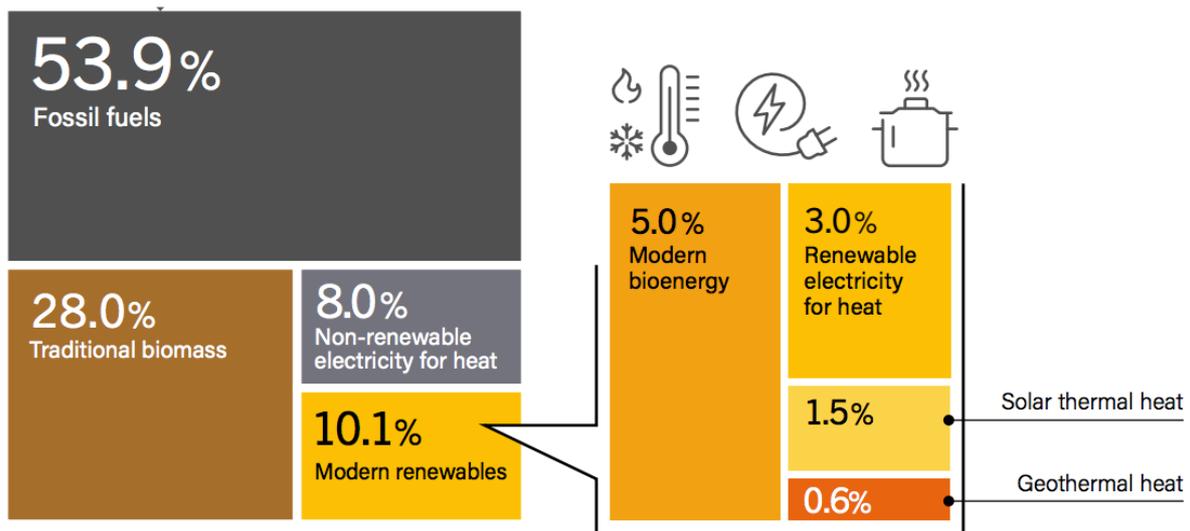


Figure 1.13 : Répartition du pourcentage de l'utilisation de chaque énergie renouvelable et non renouvelable, dans le bâtiment (REN21, 2020).

On remarque que les énergies fossiles occupent le plus grand pourcentage parmi l'utilisation de la totalité des énergies qui est un pourcentage non négligeable. 46,1% de l'utilisation des énergies est répartie sur différents types d'énergie renouvelable.

I.6.3. Cadre Algérien

Actuellement, le secteur des hydrocarbures se retrouve sous plusieurs crises ; le changement climatique, l'exploitation de gaz de schistes, la déstabilisation des prix du pétrole pour laquelle l'économie de l'Algérie est dans une situation difficile. À côté de cela, il n'est pas possible de négliger le caractère des hydrocarbures, polluant, et ne correspondant pas aux démarches du développement durable, alors que les besoins énergétiques en Algérie, aujourd'hui sont généralement satisfait par différents hydrocarbures.

Dans ce cadre, une solution s'impose ; recourir aux démarches de développement durable, pour atteindre l'efficacité énergétique, et ce grâce aux énergies renouvelables (TAGREROUT & ATMANIA, 2021).

Le graphe ci-dessous représente le pourcentage de la consommation énergétique finale des énergies renouvelables ; un pourcentage de 0.2% en 2018 est très faible. (The Energy Progress Report, 2021).

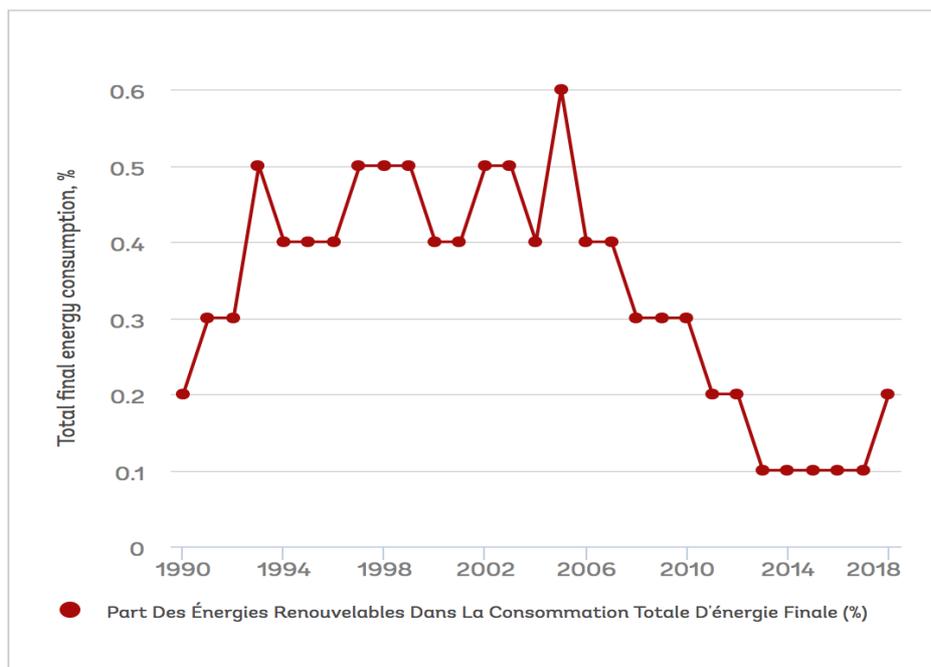


Figure 1.14 : Part des énergies renouvelables parmi la consommation totale d'énergie finale, 1990 – 2018 (The Energy Progress Report, 2021).

L'Algérie est un pays qui connaît une augmentation considérable de la consommation d'énergie en cette dernière décennie. (Voir figure 15).

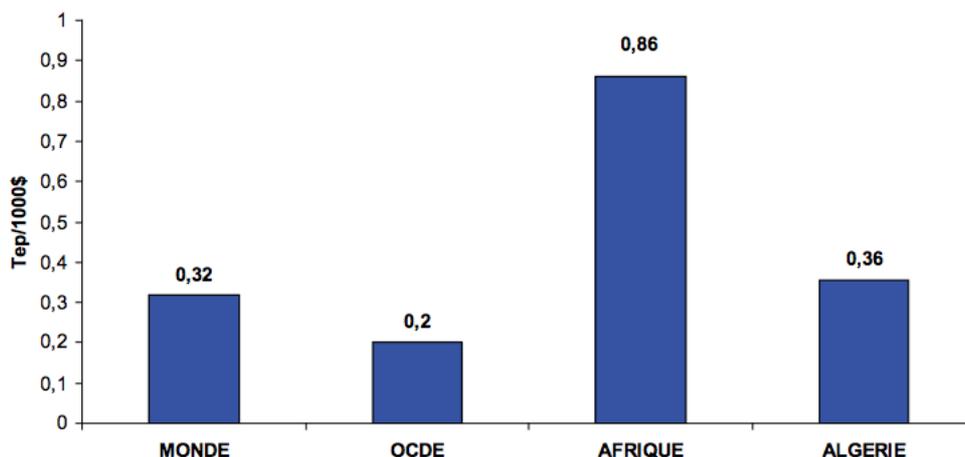


Figure 1.15 : État des Intensités Énergétiques en 2005 (APRUE, Consommation Énergétique Finale de l'Algérie, 2007)

Le secteur du bâtiment en Algérie représente 37% de la consommation d'énergie finale. Les perspectives du développement du secteur tertiaire risquent d'engendrer un accroissement fort de la consommation d'énergie. De plus, le climat en Algérie est connu pour être très vulnérable et sensible au changement climatique, d'où la nécessité de penser aux meilleurs moyens d'isoler les constructions tout en maîtrisant la consommation énergétique, qui constitue le défi des prochaines décennies. Un programme nommé « Eco-Bât » soutenu par l'APRUE vient répondre à cette problématique, et a pour objectif de réduire la consommation énergétique due au chauffage et à la climatisation. En d'autres termes intégrer les mesures d'efficacité énergétique dans le secteur du bâtiment. (APRUE, 2019)

Voici quelques points tirés du programme « Eco-Bât » :

- *« L'amélioration de l'enveloppe du bâtiment et l'isolation des toitures ainsi que l'utilisation de la menuiserie performante »*
- *La limitation des transferts de chaleur entre l'intérieur du bâtiment et l'environnement extérieur*
- *La mobilisation des acteurs du bâtiment autour de la problématique de l'isolation thermique*
- *La formation d'une main d'œuvre qualifiée*
- *La création d'un marché durable et compétitif des matériaux et équipements contribuant à l'isolation thermique*
- *La réduction des émissions de CO₂ »* (APRUE, 2019)

Chaque année, le comité intersectoriel de la maîtrise de l'Énergie « CIME » détermine la consistance du programme, en considérant le programme de construction et les matériaux isolants disponible sur le marché (APRUE, 2019).

I.6.4 Les énergies renouvelables

Le moteur capital de l'économie moderne est l'énergie, ou plutôt l'énergie primaire, sources fossiles, nucléaires et renouvelables, pour générer de la chaleur, de l'électricité, et tout travail pouvant fournir les services énergétiques qui nous procure ce dont on a besoin pour nos activités quotidiennes. La figure ci-dessous nous montre le pourcentage de chaque type d'énergies dans la TFEC (UNESCO-UNEVOC, 2020).

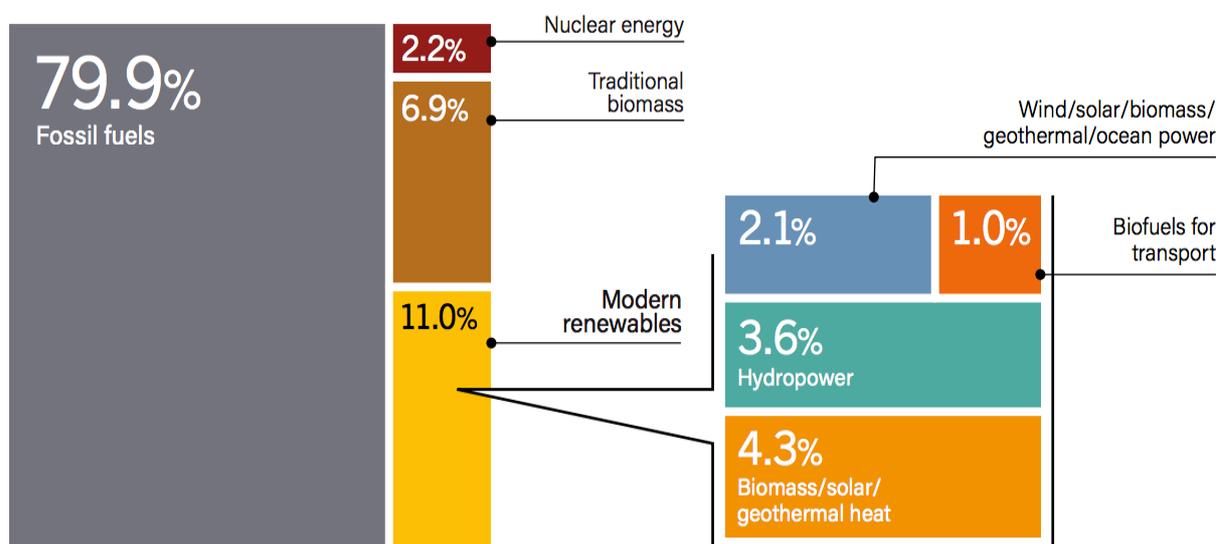


Figure 1.16 : Estimation de la part des énergies renouvelables dans la TFEC (REN21, 2020).

Compte tenu des graves effets du changement climatique directement liée à l'utilisation de combustibles fossiles et nucléaires, il se trouve incontournable de s'orienter vers les énergies renouvelables. Cela aidera à aller vers une croissance « verte » et de développement durable de l'économie (UNESCO-UNEVOC, 2020).

I.6.4.1. Les types d'énergies renouvelables

Dans une grande partie du monde, l'énergie solaire est la ressource la plus disponible abondamment. C'est aussi la ressource pour laquelle se sont développées les technologies les plus attrayantes. Ceci attirera l'attention des consommateurs vers tous les avantages économiques et environnementaux que présente l'utilisation des énergies renouvelables pour fournir la chaleur et l'électricité. De nos jours, quelques parties du globe sont arrivées à des stades très avancés dans le marché de cette ressource, tel que l'Amérique du Nord et l'Europe, et ont développé des aspects techniques très sophistiqués (UNESCO-UNEVOC, 2020).

Des programmes de formation sont mis à la disposition de tout pays voulant adopter les technologies développées sur l'énergie solaire. Dans le domaine de la construction, l'énergie solaire peut procurer du chauffage à l'intérieur des constructions, chauffe-eau solaire, et la production d'électricité (UNESCO-UNEVOC, 2020).

D'autres énergies renouvelables sont aussi d'une grande efficacité, à l'exemple de l'énergie éolienne qui a connu un dynamisme exceptionnel dans le continent européen, et représente près de 70% de la production mondiale d'énergie électrique. La biomasse concerne à la fois le biogaz et le bois-énergie permet la réduction du CO₂ ainsi que le soufre. Le biogaz limite les émissions de gaz à effet de serre, et gère les déchets ménagers agricoles et industriels. Il peut être transformé en chaleur ou produire de l'électricité, et cela à l'aide de moteurs thermiques ou des bitubes à gaz. On cite également l'énergie hydraulique qui est une énergie très facile à maîtriser (Dominique, 2001).

I.6.5. La réglementation thermique en Algérie

L'Algérie a mis en place une plateforme juridique dans le but de rationaliser l'utilisation de l'énergie dans le bâtiment. Cette plateforme comporte des lois, des décrets, des arrêtés et des documents techniques réglementaires (DTR) portant des indications sur la promotion des énergies renouvelables, l'adaptation de ventilation naturel, la considération des améliorations apportées au domaine de la thermique... etc. (Ansar & Djebaili, 2017).

Le dernier DTR publié en 2017 a défini les réglementations à propos de la conception thermique (climatisation et chauffage) des bâtiments, consistant à limiter les déperditions énergétiques en hiver et les apports énergétiques en été. Cela permettra d'économiser l'énergie nécessaire pour garantir un meilleur confort.

Actuellement, ce fond juridique ne concerne que les constructions neuves et non pas l'existant (Ansar & Djebaili, 2017).

Conclusion

Ce chapitre a été dédié à l'établissement d'un état de l'art sur le confort thermique et l'efficacité énergétique. Dans un premier temps nous avons définis le confort thermique et sa pluridisciplinarité, étant une notion assez complexe. Son absence peut provoquer des comportements énergivores, influant ainsi sur l'efficacité énergétique des constructions dont nous avons illustré l'intérêt en deuxième lieu. En dernier lieu nous avons abordé ces deux notions dans le cadre de l'Algérie. Dans le prochain chapitre, il convient de présenter les stratégies de rénovation pour atteindre l'efficacité énergétique tout en procurant un confort thermique dans le bâtiment.

CHAPITRE II

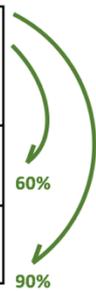
LA RÉNOVATION THERMIQUE

Introduction

Depuis les années 1970, les exigences sur les nouvelles constructions ne concernent plus seulement l'isolation thermique des parois, elles concernent l'efficacité énergétique globale des bâtiments. L'apparition de différents labels comme BBC effinergie apparue en France, Minergie et Minergie A en Suisse, ou Plusenergiehaus en Allemagne et BEPOS en France desquels bénéficient les bâtiments producteurs d'énergie dits « bâtiments à énergie positive », ont fortement contribué à la réduction de la consommation énergétique des constructions neuves. Malgré les améliorations exceptionnelles constatées dans les ouvrages neufs, le défi majeur de « rénover le parc existant » ne doit pas être occulté (Markus, Lucie, PFLUG, & Bettina, 2014). Le tableau qui suit démontrera l'efficacité de la rénovation à économiser l'énergie.

Tableau 2.1 : Potentiel d'amélioration de la performance énergétique des constructions en litre de mazout par mètre carré par an avant et après rénovation (Markus, Lucie, PFLUG, & Bettina, 2014).

Niveau moyen de la performance énergétique du parc de logements existant (France et Suisse)	>18 L
Niveau minimal selon les normes énergétiques après rénovation	8L
Niveau d'exigences élevé selon labels BEPOS ou Minergie-P après rénovation	3L



Pourcentage de réduction

Le tableau affiche le potentiel d'amélioration de la performance énergétique du parc de logements existant en France et en Suisse avant et après rénovation. Après la rénovation le parc nécessite jusqu'à 90% de moins de litres de mazout par mètre carré par an par rapport à leur état actuel. Un pourcentage non négligeable qui montre clairement l'efficacité de la rénovation dans l'économie.

II.1. Définition de la rénovation

Il existe une multitude de termes pour décrire les mesures de construction pouvant être appliquées aux bâtiments existants, qui viennent compléter celui de rénovation : réhabilitation, transformation, modernisation, restauration, maintenance, dénoyautage. Chacune de ces notions revient sur un certain degré de rénovation ; ça va de petites réparations à une entière

réfection du bâtiment. Par ailleurs, les intentions appliquées aux bâtis découlent de champs très différents : technique, fonctionnel, esthétique (Georg, et al., 2012).

Les mesures de rénovation s'appliquent à des éléments de construction, des surfaces intacts sans entraîner des modifications essentielles à la structure porteuse (Georg, et al., 2012).

II.2. Transformé ou démolir

Lors d'une réhabilitation thermique, une question primordiale se pose ; s'il est plus avantageux d'effectuer une rénovation globale ou alors une démolition puis reconstruire conformément aux normes actuelles. La transformation et la rénovation sont clairement la solution nécessitant moins d'énergie non renouvelable et de plus faibles taux d'émissions de GES pour leur édification. La plus grande part d'économie réside dans la conservation de l'ossature existante qui est celle qui nécessite le plus de ressources pour la construction des planchers, les parois porteuses extérieures et intérieures et les poteaux. À côté de cela s'ajoutent d'autres critères pour choisir entre transformation ou démolition comme la possibilité de changer la distribution des locaux et de réorganiser les fonctions ou d'ajouter des étages supplémentaires (Markus, Lucie, PFLUG, & Bettina, 2014) ;(Roberto, 2008).

Un autre avantage de la rénovation réside dans le fait de pouvoir limiter les extensions des villes qui ont tendance à se faire en raison de la rareté des terrains constructibles. Ainsi on limitera la longueur des trajets domicile-lieu de travail et d'autres conséquences négatives aussi. De cette manière, la rénovation du tissu urbain s'avère inévitable (Roberto, 2008).

La figure ci-dessous présente une comparaison des émissions de GES et de l'exploitation d'énergie grise entre une nouvelle construction et une transformation d'un immeuble de quatre niveaux avec 1000 m de surface de plancher et 35% de part de fenêtres à Segantini strasse en Suisse.

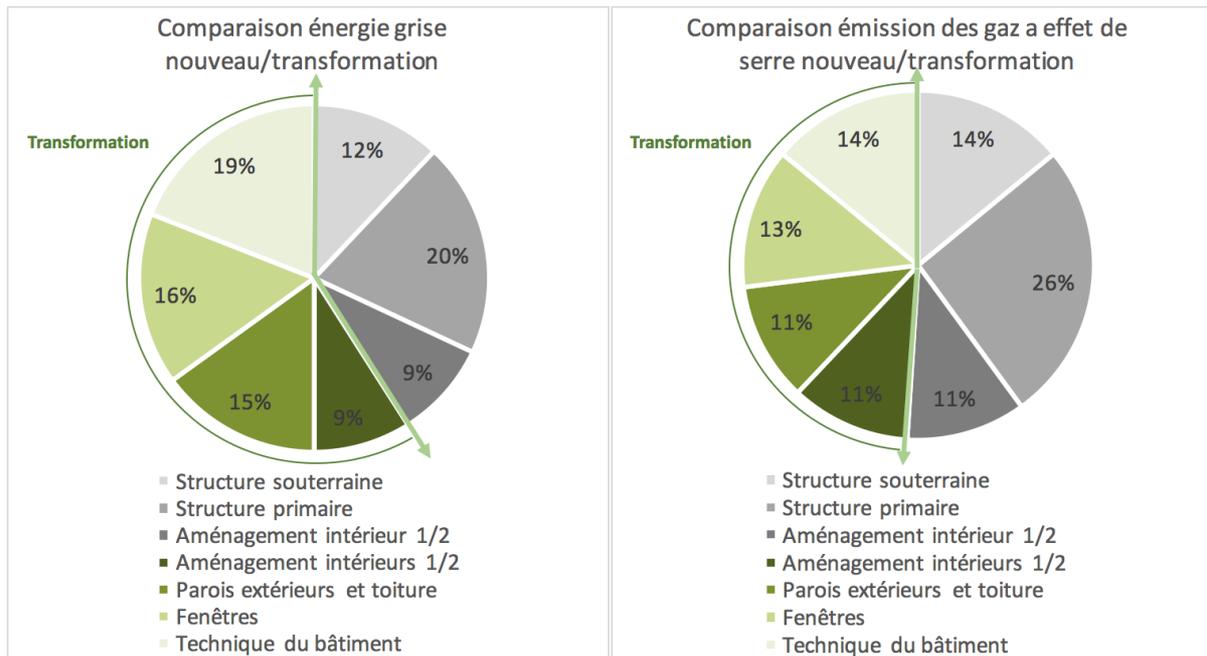


Figure 2.1 : Comparaison des émissions des GES et d'énergie grise entre une nouvelle construction et une transformation (Markus, Lucie, PFLUG, & Bettina, 2014).

On remarque qu'une transformation ne nécessite que 60% de l'énergie grise d'une construction nouvelle (100%) et 50% des émissions des GES d'une construction nouvelle (100%). La rénovation constitue donc une économie non négligeable.

II.3 Rénover globalement ou partiellement

La rénovation partielle concerne uniquement une partie de la construction, par exemple le rez-de-chaussée ou la façade seulement. Il est difficile d'organiser ce genre d'opération ; elle s'effectue en plein fonctionnement (Georg, et al., 2012). D'un point de vue énergétique, opter pour rénovation globale est indispensable, en étudiant dès le début tout élément nécessitant une mise à niveau (Markus, Lucie, PFLUG, & Bettina, 2014).

On site l'isolation de l'enveloppe, les équipements techniques, l'aménagement intérieurs et les finitions et les aménagements extérieurs. Autrement, il n'est pas certain que les solutions soient optimales. Par exemple si on change les fenêtres sans isoler les façades ni améliorer la ventilation du bâtiment, cela peut engendrer des moisissures ou des condensations. (Markus, Lucie, PFLUG, & Bettina, 2014).

Avant d'envisager des travaux de rénovation, il est nécessaire d'évaluer l'état du bâtiment avec précision, et ce, non seulement du volet énergétique, mais aussi une analyse globale de la situation, un développement de scénarios d'intervention, en plus d'évaluer les

coûts des travaux, le financement, ainsi que les économies réalisables à longue portée (Markus, Lucie, PFLUG, & Bettina, 2014).

II.4 Stratégie de rénovation

Pour une maison individuelle, on peut directement s'adresser à un bureau d'étude thermique pour faire une visite de la maison à rénover, puis établir un rapport qui contiendra une analyse de la consommation d'électricité ainsi qu'une évaluation thermique de l'enveloppe.

Pour un immeuble, des outils sont mis en place pour aider les spécialistes à la décision et à l'orientation des maîtres d'ouvrages dans leur projet. La méthode EPIQR par exemple est un outil efficace de diagnostic et de calcul budgétaire de rénovation. Il s'agit d'évaluer les installations techniques, la structure et l'enveloppe, la recherche d'amiante (Markus, Lucie, PFLUG, & Bettina, 2014). Un code d'intervention et de dégradation sont attribués aux éléments techniques et constructifs du bâtiment selon leur état ; le tableau ci-dessous montre la répartition des codes sur les différents éléments évalués selon leur état (EPIQR, 2018).

Tableau 2.2 : Code de dégradation et d'intervention donnés par EPIQR (EPIQR, 2018)

Code de dégradation		Code d'intervention	
a	Bon état	1	Aucun travaux
b	Dégradation légère	2	Réfections légères
c	Dégradation importante	3	Réfections importantes
d	Fin de durée de vie	4	Réfection complète

Suite à tous ces données, l'état du bâtiment est bien clair, et les spécialistes peuvent enfin proposer des scénarios d'intervention accompagné d'une estimation des coûts.

La figure qui suit présentera des résultats de bilan énergétique d'un centre commerciale.

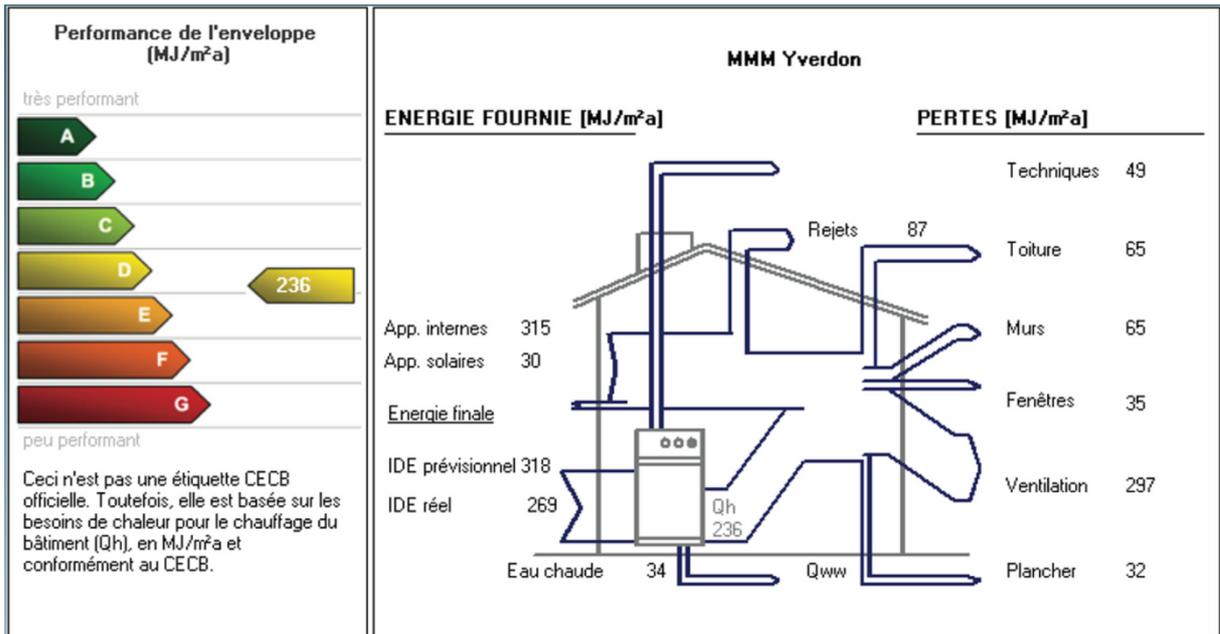
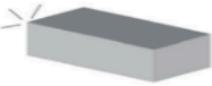
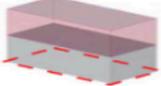
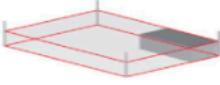
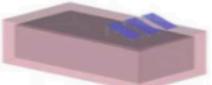


Figure 2.2 : Exemple d'étiquette énergétique et de bilan énergétique (EPIQR+, 2014)

Ce bilan à ressortie la grandeur de pertes de chaleur due à la ventilation qui sont de 297 MJ/m²a. Ces résultats guideront vers des scénarios de rénovation en prenant en compte l'optimisation énergétique (EPIQR+, 2014).

Dans le cadre d'entreprendre un projet de rénovation, des critères principaux sont nécessaires à prendre en compte. Le tableau ci-après les récapitule.

Tableau 2.3 : Critères à prendre en compte avant l'entreprise d'un projet de rénovation (Markus, Lucie, PFLUG, & Bettina, 2014)

		Rénovation	Démolition et reconstruction
+ Critère plutôt favorable à la méthodologie correspondante (rénovation ou reconstruction)			
- Critère plutôt défavorable à la méthodologie correspondante			
= Critère devant être garanti selon l'une ou l'autre méthode			
Diagnostic de l'existant			
	Structure existante en bon état Pas ou peu de renforts structurels à prévoir Bonne orientation	+	-
	Structure existante fortement dégradée Renforts obligatoires Mauvaise orientation	-	+
	La part constructible de la parcelle est déjà optimisée Une surélévation est possible L'aménagement des combles est autorisé	+	-
	La part constructible de la parcelle n'est pas optimisée Une nouvelle conception architecturale est possible Les règles d'urbanisme autorisent plusieurs niveaux	-	+
Concept énergétique à valider			
	Amélioration de l'enveloppe possible Remplacement des fenêtres possible Atteinte des exigences énergétiques visées	=	=
	Nouvelle installation de chauffage Distribution de chauffage optimisée Nouvelle installation de ventilation et réseaux	=	=
	Concept zéro énergie possible Installations solaires (photovoltaïques et/ou thermiques)	=	=
	Prise en compte de l'énergie grise Prise en compte des émissions de GES	+	-
Gestion du chantier			
	Chantier en site occupé Nuisances réduites en chantier (centre-ville) Rapidité de montage	+	-
	Site inutilisé ou inoccupé Réaffectation complète Augmentation significative du nombre de niveaux	-	+
Autres critères			
	Protection du patrimoine		
	Aménagements intérieurs	=	=
	Aménagements extérieurs		

Les critères élaborés dans ce tableau sont divisés en diagnostic de l'existant, des concepts énergétiques à valider, la gestion du chantier, ainsi que d'autres critères. Un ingénieur thermicien peut fournir une étude complète du logement pour préciser les points améliorables pour qu'il devienne moins énergivores (Markus, Lucie, PFLUG, & Bettina, 2014).

II.5 Technique de rénovation passive

Lorsque l'on travaille sur un ouvrage existant, il n'est pas possible de profiter de toutes les mesures passives qui peuvent répondre aux besoins du bâtiment sans avoir besoin d'apport énergétique pour fonctionner tel que la compacité de la construction qui limite les échanges avec l'extérieur, l'orientation de la construction qui est immuable, ou alors l'agencement des espaces intérieurs n'étant pas souhaitable de modifier, qui lui, peut faciliter le chauffage lorsque sa conception ainsi que la dimension des volumes sont en cohérence avec leur principale utilisation (Markus, Lucie, PFLUG, & Bettina, 2014).

L'action doit généralement être concentré sur les mesures constructives pour agir de façon efficace. Ainsi, l'enveloppe et les façades représentent le cœur du concept de rénovation. Cela permettra d'améliorer l'isolation thermique, mais aussi d'optimiser les ouvertures existantes (Markus, Lucie, PFLUG, & Bettina, 2014).

II.6. Technique de rénovation active

Pour conférer le maximum de confort a quotidien, les mesures actives assistent les mesures passives, qui eux sont limitées par l'environnement et les conditions météorologiques. En rénovation, il est question de disponibilité de place et d'acheminement pour intervenir sur les installations techniques de chauffage et de ventilation et les modifier ou les remplacer (Markus, Lucie, PFLUG, & Bettina, 2014).

II.7. Mesure de rénovation

Une rénovation globale doit principalement remplir les critères d'isolation continue au niveau de l'enveloppe, une étanchéité à l'air continue ainsi qu'une ventilation adaptée. Ces trois points contribuent à la réduction des ponts thermiques, et ainsi le coefficient de déperdition thermique U [W/m^2k] des parois et aussi réduit. Ils contribuent aussi à la protection contre l'humidité, chose qui nécessite un renouvellement d'air relié au niveau de l'isolation thermique et à la superficie de la construction. Sans l'intervention des utilisateurs. Cette ventilation devrait s'opérer par des concepts de ventilation naturelle, ou pas, et non pas par infiltration (fissures ou joints). Les interruptions de l'enveloppe d'isolation sont parfois inévitables ; dans ces cas, on essayera seulement de réduire les effets négatifs au maximum (Georg, et al., 2012).

II.8. Les ponts thermiques

Particulièrement en rénovation, le traitement des ponts thermiques reste un point crucial. L'isolation des façades, les toitures et la dalle entre le rez-de-chaussée et le sous-sol présentent souvent des discontinuités due au procédé de construction manquant de précision, et c'est là que les ponts thermiques ponctuels ou linéaires sont nées (Dominique, 2001). S'ils sont importants, ces derniers peuvent entraîner des chutes locales de températures sur la surface intérieure, s'enchaînera après une condensation, source de moisissures et d'autres dommages. Les ponts ponctuels sont ceux qui engendrent le plus de problèmes d'humidité. Le remplacement de fenêtres pour diminuer le renouvellement d'air augmente l'humidité ambiante et donc les moisissures aussi à l'endroit des ponts thermiques (Georg, et al., 2012).

Il faut améliorer le pouvoir isolant des façades avec une isolation thermique par l'extérieur (ITE). L'isolation par l'intérieur à laquelle on a fait recours lorsqu'on veut préserver l'aspect historique du bâtiment nécessite plus d'attention (Markus, Lucie, PFLUG, & Bettina, 2014).

La figure qui suit illustre les endroits qui peuvent constituer des ponts thermiques.

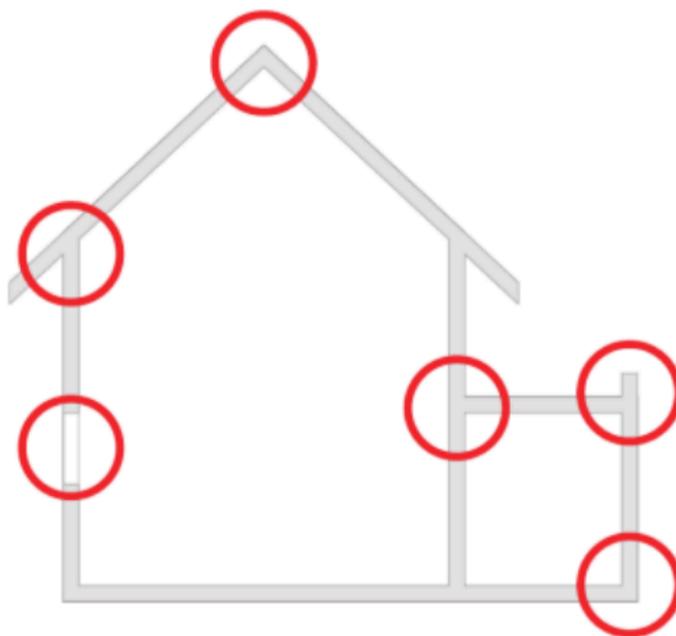


Figure 2.4 : Les nœuds pouvant constituer des ponts thermiques (Markus, Lucie, PFLUG, & Bettina, 2014).

Les endroits pouvant constituer des ponts thermiques sont nombreux, parmi eux ceux illustrés sur la figure, on cite les jonctions plancher/ paroi extérieure, les appuis et embrassures de fenêtre, les dalles de balcon continus, les jonctions cloison/ plancher sur sous-sol...etc (Markus, Lucie, PFLUG, & Bettina, 2014).

II.9. L'isolation thermique

Quand l'isolation augmente, les consommations énergétiques baissent. Elle permet de diviser le flux de chaleur en dix en comparaison avec l'absence d'isolation thermique grâce à sa résistance thermique, qui cette dernière permet de diviser le flux de chaleur en deux en la doublant. On aura donc cette loi qui exprime le flux de chaleur entre plusieurs ambiances avec des températures différentes :

$$\text{Flux} = \frac{\text{surface d'échange} \times \text{différence de température}}{\text{Résistance thermique}}$$

Les matériaux du bâtiment sont divisés en deux ; les conducteurs thermiques tel que le fer, la pierre, le béton, le verre. Les matériaux ayant une conductivité inférieure à 0,08 W (m.K) sont considérés comme isolant. Et les isolant thermique tel que la paille, la ouate de cellulose, la laine de mouton. En effet la conductivité des isolants est généralement inférieure à 0,08 W (m.K), mais il faudra une épaisseur plus importante qu'un matériau moins isolant (Jean Louis & Franck, 2017).

II.9.1. La résistance thermique des matériaux.

La résistance d'une certaine paroi est calculée par la somme des résistances de toutes les couches de la paroi. Les deux valeurs nécessaires pour cela sont l'épaisseur e de chaque couche ainsi que la conductivité thermique de son matériau notée λ en W/ (m.K).

Une grande résistance (notée R en $\text{m}^2 \cdot \text{K}/\text{W}$) nécessite une épaisseur importante et une faible conductivité, d'où la formule $R = e / \lambda$ (Jean Louis & Franck, 2017).

Par exemple la paille possède une conductivité forte, mais en utilisant une botte entière qui est d'une épaisseur de 32 à 42 cm, la résistance thermique s'élève. On retient que plus la résistance d'un matériau est important plus le matériau est isolant. Si une paroi est composée d'un matériau isolant en plus d'un élément porteur, on peut négliger la résistance thermique de ce dernier s'il est considéré comme conducteur thermique (Jean Louis & Franck, 2017).

II.9.2. L'inertie thermique :

En thermique, l'inertie et aussi une notion très importante qui influe sur la qualité d'une paroi, en plus de sa capacité d'isolation. La figure qui suit illustre la stratégie de stockage des apports de chaleur en une journée d'été, la journée et la nuit (Jean Louis & Franck, 2017).

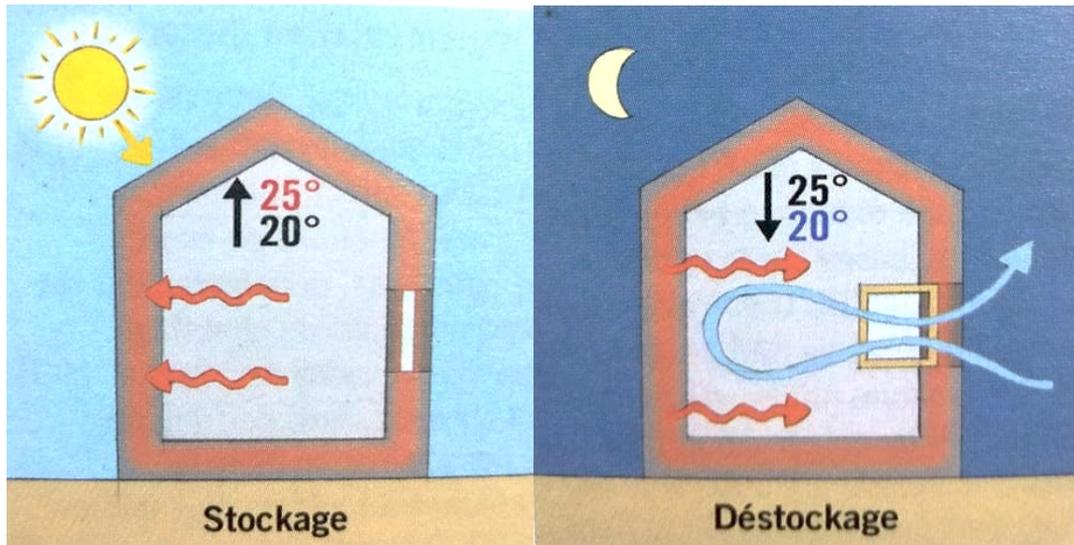


Figure 2.3 : Stratégie de stockage des apports de chaleur la journée et la nuit (Jean Louis & Franck, 2017)

Les apports de chaleur excédentaires sont stockés dans les parois en journée. La nuit quand la température extérieure est plus basse que celle des parois, les apports accumulés durant la journée sont déstockés. Prenons l'exemple d'une température d'intérieur de 22°C. Si la nuit suivante la température baisse vers 0°C et que le lendemain matin la température de la pièce descend à 15°C, l'inertie est dite faible. À l'inverse si la température est de 21°C, l'inertie est dite alors importante (Jean Louis & Franck, 2017). Les deux éléments phares de l'inertie thermique sont la quantité de capacité calorifique et la vitesse de stockage. Pour stocker suffisamment, le matériau doit être lourd et doté d'une forte capacité calorifique volumique tel que la pierre, la terre cuite, le sable ou le pisé. Pour stocker vite, les matériaux qui conduisent la chaleur sont les bons, il faut donc éviter les isolants (Jean Louis & Franck, 2017).

En effet, dans le domaine de l'isolation, chaque paroi peut être envisager indépendamment. Par ailleurs, l'inertie thermique utile doit considérer tout le local ou le bâtiment dont chacune des capacités de leurs composants est plus ou moins importante en inertie (Jean Louis & Franck, 2017).

II.9.3. Choix de l'isolant thermique :

Il existe plusieurs critères pour choisir pour choisir le type d'isolant plutôt qu'un autre. En façade, en plus de la conductivité du matériau qui indique son pouvoir isolant, il est important de vérifier sa densité pour éviter les tassements, d'identifier sa résistance au feu et

sa perméabilité à la vapeur. Il faut prendre en compte la quantité d'énergie grise que nécessite sa fabrication (Georg, et al., 2012). Voici ci-dessous quelques isolants thermiques avec leurs caractéristiques.

Tableau 2.4 : Caractéristiques des matériaux isolants (Guide des matériaux isolants)

Tableau de synthèse des matériaux d'isolation		Paramètres physiques statiques (voir définitions page 4)			Comportement à l'humidité (voir page 4)
		Densité ou masse volumique (kg/m^3)	Chaleur spécifique c (J/Kg.K)	Conductivité thermique λ (W/m.K)	Résistance diffusion vapeur d'eau μ
Les laines minérales	La laine de verre	27	1030	0,035	6
	La laine de roche	35	1030	0,038	12
	Laine minérale haute densité	150	1030	0,04	
Matériaux isolants d'origine synthétique	Polystyrène extrudé	30	1400	0,03	120
	Polystyrène expansé	20	1450	0,032	70
	Polyuréthanes	34	1450	0,029	150
	Aérogels	70	1400	0,012	100

Parmi les isolants les plus performants on retrouve les laines minérales avec une conductivité thermique ne dépassant pas 0,04 W (m.K), et les matériaux isolant d'origine synthétique avec des conductivités thermique atteignant les 0,012 W (m.K) tel que l'aérogels. Un tableau de synthèse des autres matériaux isolants présente en annexe B (Jean Louis & Franck, 2017).

II.9.3.1. Isolation thermique intérieur (ITI)

Dans le cas d'une isolation thermique intérieur, les ponts thermiques sont accentués de façon significative à tel point à observer une limite d'efficacité si l'épaisseur dépasse 6cm. Cela augmentera l'influence des ponts thermiques plus de 60%, devenant alors une source prédominante des déperditions thermiques des parois. On dira alors que l'effet de l'augmentation de l'épaisseur d'isolation devient quasiment nul. La figure 2.3 illustre les différentes couches d'une isolation thermique intérieur effectuer à un mur en maçonnerie (ISOLATION THERMIQUE DES MURS CREUX, 1998).

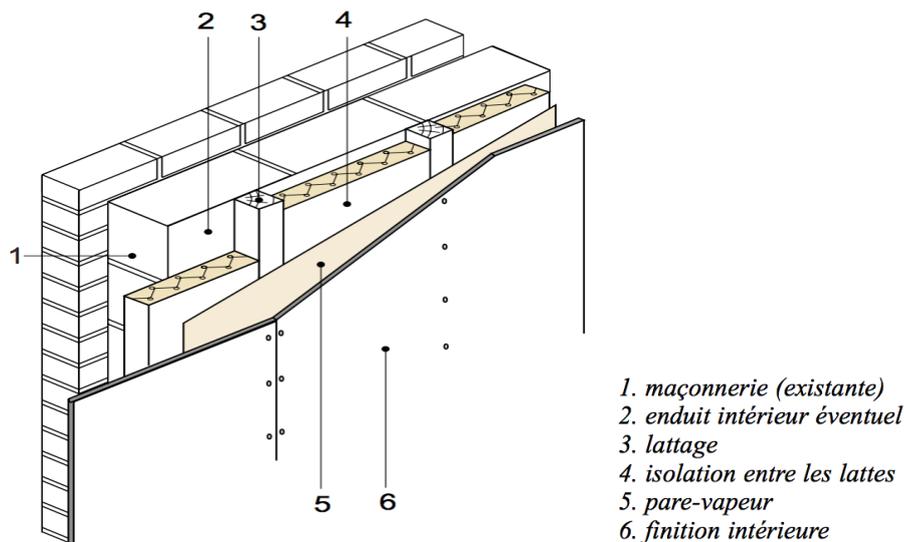


Figure 2.4 : Isolation par l'intérieur avec système de lattage (ISOLATION THERMIQUE DES MURS CREUX, 1998)

La figure illustre que l'isolation par l'intérieur nécessite un pare vapeur entre la couche de l'isolant et la finition intérieure car l'ITI peut provoquer des zones de condensation d'humidité, en plus des autres inconvénients parmi eux les écarts de température entre l'été et l'hiver pouvant provoqué des variations dimensionnelles susceptibles de causer des fissures à l'endroit des jonctions avec les parois adjacentes (ISOLATION THERMIQUE DES MURS CREUX, 1998).

Dans la figure 2.5 nous allons voir un exemple de composition de mur en brique traditionnelle d'une épaisseur totale de 386,5 mm avec une isolation thermique intérieur.

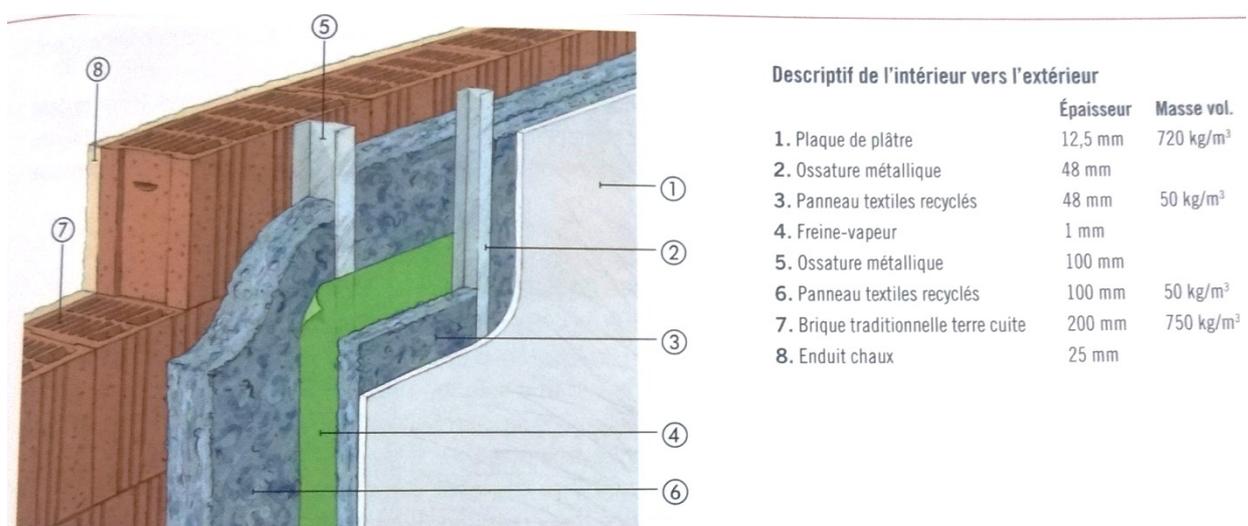


Figure 2.5 : Mur en brique traditionnelle avec ITI (Jean Louis & Franck, 2017).

Mur extérieur en brique traditionnel avec deux couches de textile recyclés sur une double ossature métallique alternée, isolant l'intérieur de la masse thermique de la brique de terre cuite. Le freine vapeur placé au sein de la nappe isolante aide à modéliser les flux de vapeur d'eau. Cette composition peut être appliquée dans des maisons individuelles ainsi que tout autre type de bâtiment (Jean Louis & Franck, 2017).

Dans la figure 2.6 nous allons voir un exemple de composition de mur en béton cellulaire d'une épaisseur totale de 485,5 mm avec une isolation thermique intérieure.

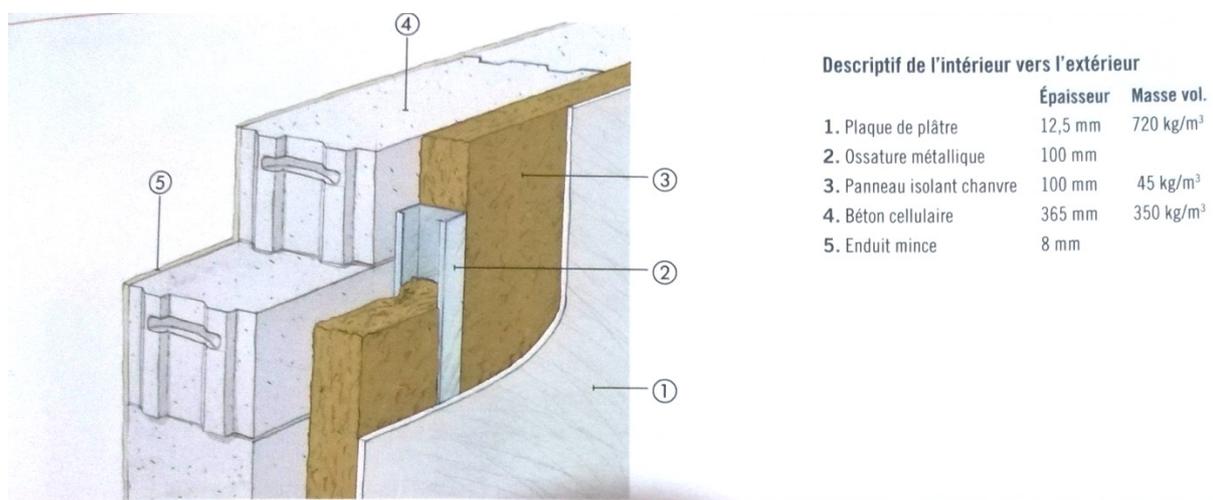


Figure 2.6 : Mur en béton cellulaire avec ITI (Jean Louis & Franck, 2017).

Mur extérieur en béton cellulaire avec une couche de chanvre de 100 mm comme isolant. La plaque de plâtre intérieure de 12,5 mm réduit la capacité à stocker les calories. C'est pour cela que cette composition n'est pas dotée d'une bonne inertie. Cette composition peut être appliquée dans des maisons individuelles ainsi que tout autre type de bâtiment (Jean Louis & Franck, 2017).

II.9.3.2. Isolation thermique extérieure (ITE)

L'isolation thermique de l'extérieur est la plus couramment utilisée. Elle met les parois à l'abri de désordres liés à l'humidité, et ce car les parois existantes sont d'une température supérieure. (ISOLATION THERMIQUE DES MURS CREUX, 1998)

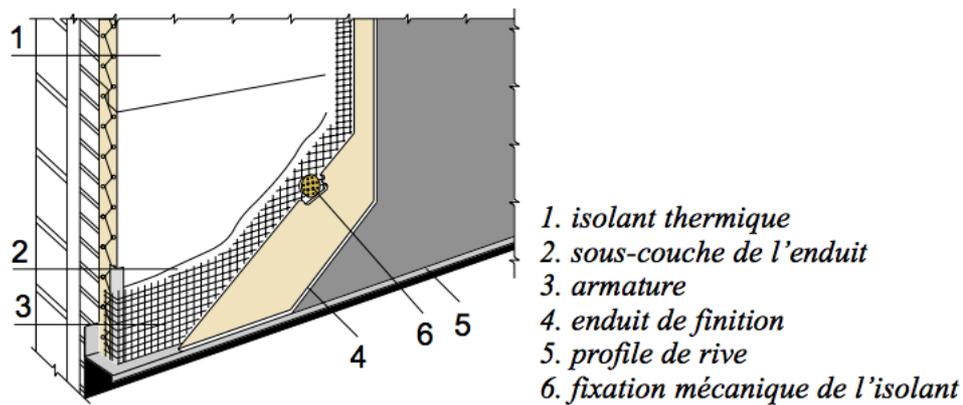


Figure 2.7 : Isolation par l'extérieur (ISOLATION THERMIQUE DES MURS CREUX, 1998).

On voit dans la figure 2.7 qu'une couche d'isolation thermique est appliquée de l'extérieur. Celle-ci est fixée par chevillage ou par une ossature secondaire en bois ou métallique. Un revêtement est également posé de l'extérieur pour assurer la finition et protéger contre toute sollicitations climatiques et mécaniques.

Dans la figure 2.8 nous allons voir un exemple de composition de mur ancien en pierre d'une épaisseur totale de 885mm avec une isolation thermique extérieure (Jean Louis & Franck, 2017).

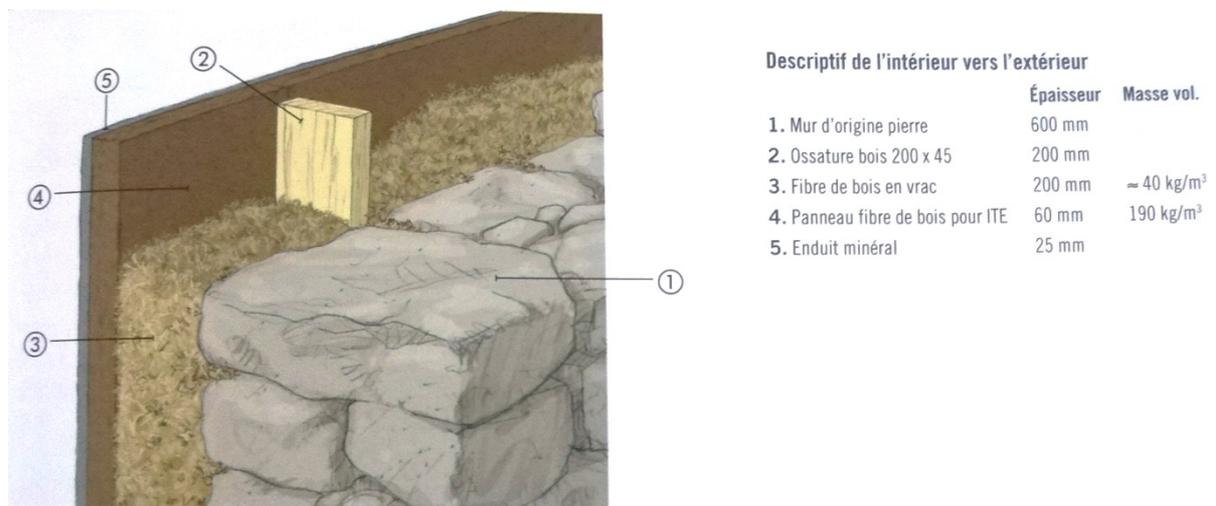


Figure 2.8 : Mur ancien en pierre avec ITE (Jean Louis & Franck, 2017).

Mur extérieur ancien en pierre avec une couche de fibre de bois en vrac de 200 mm comme isolant de l'extérieur, des ossatures en bois ainsi qu'un panneau extérieur spécifique pour ITE habituellement prévu pour être enduit (Jean Louis & Franck, 2017).

Dans la figure 2.9 nous allons voir un exemple de composition de mur ancien en pierre d'une épaisseur totale de 885mm avec une isolation thermique extérieur (Jean Louis & Franck, 2017).

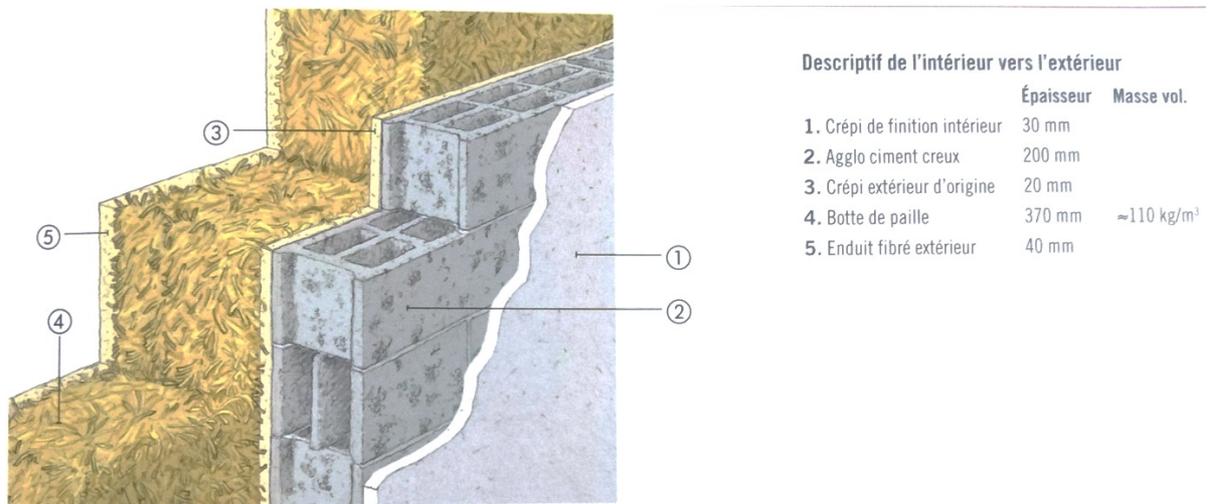


Figure 2.9 : Mur en agglo de ciment creux avec ITE (Jean Louis & Franck, 2017).

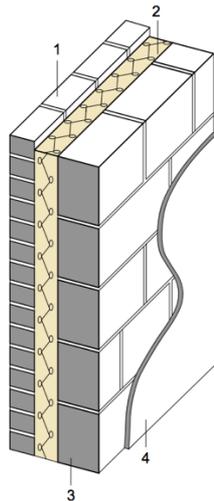
Mur extérieur en agglo de ciment creux avec une couche de botte de paille de 370 mm comme isolant de l'extérieur. Cet isolant a récemment connu un intérêt croissant dans la restauration bioclimatique vue de sa formule très performante (Jean Louis & Franck, 2017).

II.9.3.3. L'isolation par remplissage de la coulisse

L'isolation par remplissage de la coulisse consiste à remplir complètement la coulisse par insufflation de :

- Perlite siliconée ;
- Billes de mousse de polystyrène expansé ;
- Laine minérale en flocons.

Cette technique peut augmenter le niveau de sollicitations dans la maçonnerie (contrainte thermique de gel). Son avantage est qu'elle permet de conserver la méthode constructive couramment utilisée (ISOLATION THERMIQUE DES MURS CREUX, 1998).



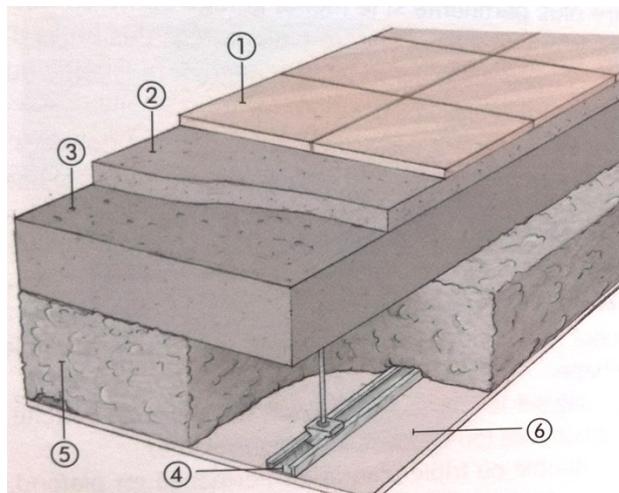
- 1. maçonnerie de parement
- 2. isolant thermique
- 3. maçonnerie portante
- 4. enduit

Figure 2.10 : Isolation par remplissage de la coulisse (ISOLATION THERMIQUE DES MURS CREUX, 1998).

Au niveau de l'élévation de la maçonnerie on place à l'intérieur de la coulisse des panneaux d'isolation, en veillant à sa bonne jonction. La laine minérale hydrofugée et semi-rigide sont les isolant les plus couramment utilisés.

II.9.3.4. Les planchers

Le plancher bas, qui est une paroi horizontale dont la face supérieure seulement donne sur un local chauffé consiste une source de déperdition thermique souvent importante. Pour atteindre une bonne efficacité énergétique, au même titre que les autres parois du bâtiment, les planchers doivent aussi être isolés. La figure 2.11 démontrera un exemple d'isolation de plancher bas (Jean Louis & Franck, 2017).



Descriptif du haut vers le bas

	Épaisseur	Masse vol.
1. Carrelage	15 mm	
2. Chape ciment	40 mm	
3. Dalle béton précontraint	140 mm	
4. Ossature métallique		
5. Ouate de cellulose	200 mm	40 kg/m ³
6. Fermacell	12,5 mm	1 150 kg/m ³

Figure 2.11 : Isolation d'un plancher bas sur dalle en béton (Jean Louis & Franck, 2017).

Le plancher bas existant est d'une épaisseur de 407,5 mm. Il est constitué d'une dalle de béton précontraint de 14 mm, une chape de ciment et un carrelage. Pour isoler ce plancher, une couche de 200 mm de ouate de cellulose a été posée en sous-face de la dalle fixer avec une ossature métallique. Une plaque fermacell vient couvrir le tout. Cette composition peut être appliqué dans plusieurs cas comme en maison individuelle ou en collectif, entre une habitation et un garage au rez-de-chaussée, et même sur un parking ouvert au vent (Jean Louis & Franck, 2017).

II.9.3.5. Isolation de la toiture

Plusieurs systèmes d'isolation des toitures sont possibles (Jean Louis & Franck, 2017):

- Isolation entre chevrons ;
- Isolation sur chevrons ;
- Isolation sous chevrons ;
- Combinaison des trois cas précédents.

Il est conseillé de mettre en place un frein-vapeur avec régulation d'humidité pour faciliter l'évaporation de l'eau de condensation vers l'intérieur en hiver. Au niveau des toiture plate, si celles-ci sont étanches, il est possible de poser un isolant sur les bandes d'étanchéité. Dans la figure suivante, un exemple d'isolation de toiture sur comble perdus est présenté (Jean Louis & Franck, 2017).

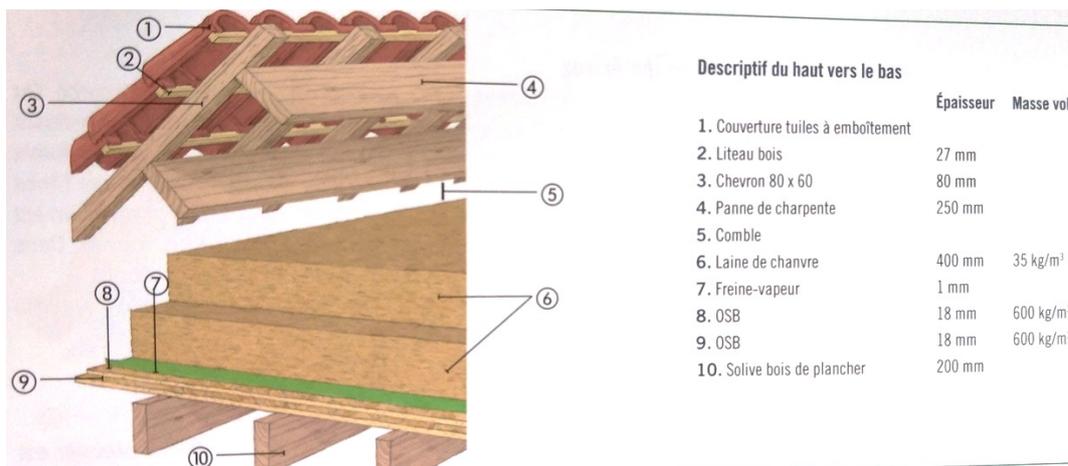


Figure 2.12 : Isolation d'une toiture avec tuile sur comble perdus (Jean Louis & Franck, 2017).

L'isolation dans ce cas est réalisée par deux nappes croisées de 200 mm en laine de chanvre disposé sur le plancher des combles qui est disposé sur des solives en bois. Cette composition peut être appliquée dans les couverture de tout type de bâtiment (Jean Louis & Franck, 2017).

La végétation des toitures contribue à son isolation thermique, et participe ainsi à économiser l'énergie et à diminuer les émissions de GES (Dominique, 2001).

II.10. Les fenêtres

Une paroi extérieure d'une haute efficacité énergétique incluse tout élément opaque et vitrée. Ces derniers sont les éléments les plus complexes de l'enveloppe étant la source de lumière naturelle et donc assurent les gains solaires passifs, en plus d'être composants essentiels de la ventilation. En revanche, sur le plan thermique elles forment un point faible pour sa conductivité thermique moins bonne que celle des murs (Georg, et al., 2012). Il faut donc bien choisir les fenêtres en prenant en compte les paramètres illustrés sur la figure suivante (Markus, Lucie, PFLUG, & Bettina, 2014).



Figure 2.14 : Élément d'une fenêtre influant sur son coefficient de transmission (Markus, Lucie, PFLUG, & Bettina, 2014)

La qualité du vitrage (simple, double, triple), la performance des cadres, et les ponts de froid à l'endroit des intercalaires illustré dans la figure 2.14 influent directement sur le coefficient de transmission globale de la fenêtre U_w , en plus des dimensions et de la géométrie de la fenêtre (Markus, Lucie, PFLUG, & Bettina, 2014).

L'installation des fenêtres est aussi très importante. Elle ne doit pas interrompre l'enveloppe isolante, elle doit garantir l'étanchéité à l'eau, ainsi que la jonction mur/cadre qui doit être étanche à l'air (Georg, et al., 2012).

Pour améliorer la thermique des façades, il est nécessaire de remplacer les fenêtres ne présentant pas de bonne performance. Il faut prendre en considération la façon de disposition des fenêtres sur les murs (Markus, Lucie, PFLUG, & Bettina, 2014).

II.11 L'étanchéité à l'air

Le concept d'étanchéité à l'air est aussi important que l'isolation thermique. L'une des enveloppes doit être conjointe à l'autre. La bonne conception permet plusieurs avantages tel que le bon fonctionnement de l'installation de ventilation. La réduction des échanges d'air par les infiltrations et donc la diminution de la consommation énergétique. L'absence de condensation dus à l'humidité grâce à la circulation d'air dans les éléments de construction, sa permet aussi un meilleur confort par l'absence de courant d'air, et même des avantages sur le plan acoustique (Georg, et al., 2012).

II.11.1 Ventilation naturelle

Une des méthode passive qui assure le renouvellement d'air la ventilation naturelle. En plus des débits venus de l'ouverture des portes et des fenêtres, des ouvertures spécialement dédiés à la ventilation. Le débit d'air dans ce cas varie selon les conditions d'exploitation (Markus, Lucie, PFLUG, & Bettina, 2014).

II.11.2 Ventilation mécanique

Il est difficile de profiter d'une ventilation naturelle dans un local profond et muni d'ouverture latéral uniquement (Markus, Lucie, PFLUG, & Bettina, 2014). L'installation la plus couramment utiliser est la ventilation mécanique contrôlée à double flux dite simple, en récupérant la chaleur pour économiser de l'énergie que nécessite le conditionnement de l'air neuf. Le principe d'aération est mieux illustré dans la figure 2.15 (Bâtiments d'habitation : Systèmes d'aération standard, 2013).

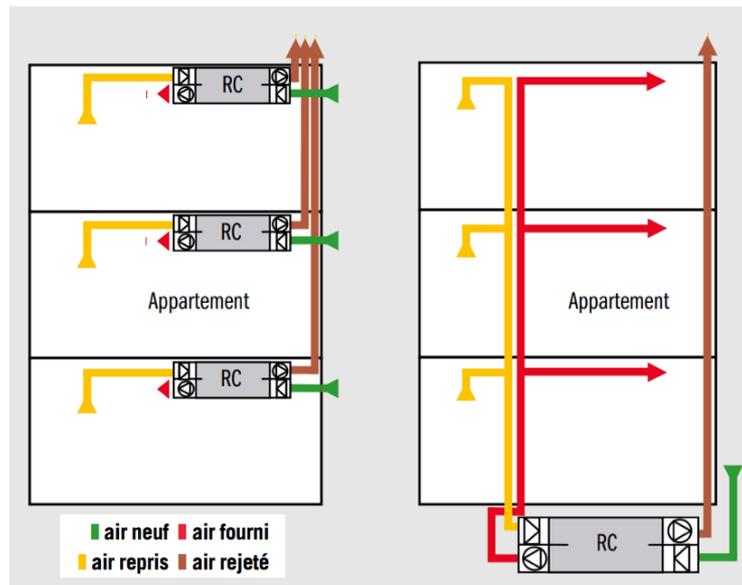


Figure 2.15 : Schéma explicatif de l'installation de ventilation simple (Bâtiments d'habitation : Systèmes d'aération standard, 2013)

La figure explique le principe d'installation individuelle de ventilation simple à gauche, à droite une installation collective pour plusieurs appartements. L'air est fourni à partir de l'extérieur (conduite verte) vers la conduite rouge pour être introduit dans les pièces de séjour ainsi que les chambres à coucher. L'air est ensuite repris (conduite jaune) depuis les bains et WC et cuisines et rejeté vers l'extérieur (conduite marron) (Bâtiments d'habitation : Systèmes d'aération standard, 2013).

Ce système de ventilation nous fait profiter de plusieurs avantages :

- Un renouvellement d'air uniforme et performant en matière d'hygiène ;
- Évacuation en permanence de l'excès d'humidité ainsi que tout polluant dans l'air ambiant ;
- Performant en termes d'isolation acoustique ;
- Retient la poussière et le pollens grâce à des filtres à particules F7
- Un bon fonctionnement durant tous les temps (Bâtiments d'habitation : Systèmes d'aération standard, 2013).

Les installations de ventilation mécanique tel que la ventilation simple sont complété par d'autres systèmes de climatisations naturelle tel que les puits canadiens. Cependant, la mise en œuvre de ses derniers dans le cadre d'une rénovation est difficile car ils nécessitent la réalisation de travaux de terrassement importants (Markus, Lucie, PFLUG, & Bettina, 2014).

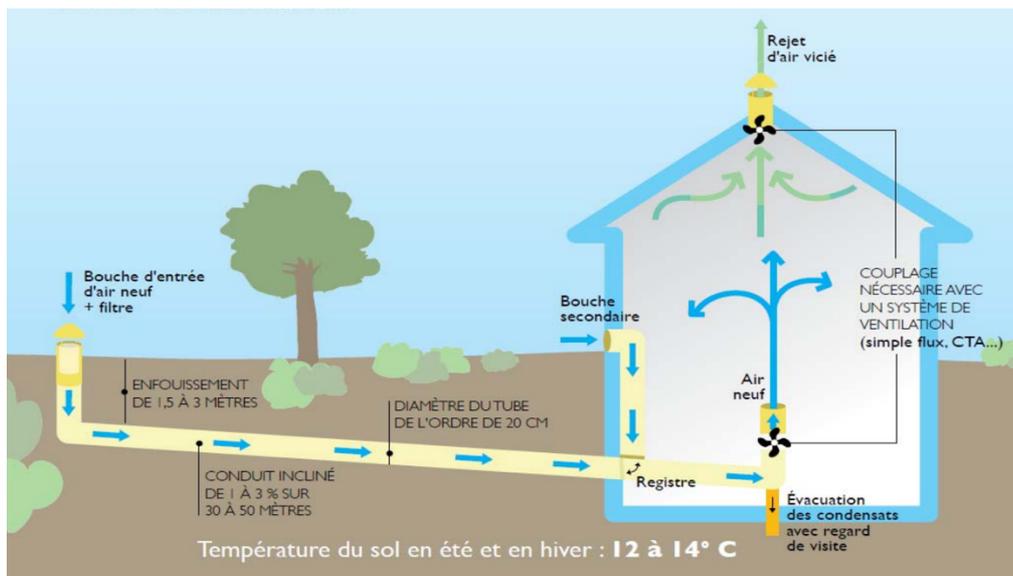


Figure 2.16 : Principe de fonctionnement d'un puits climatique (Puits canadien Puits provençal, 2017).

La figure illustre le principe de fonctionnement d'un puits climatique dis canadien ou provençal. Le principe consiste à conduire l'air de l'extérieur vers l'intérieur par un tube de 20 cm de diamètre, enterré à une profondeur de 1,5 à 3 mètre. La température à cet endroit varie très peu. Une fois l'air est au contact du sol, un échange de chaleur s'effectue dans un sens ou l'autre avant de pénétrer dans le bâtiment grâce à une ventilation (François, 2017).

Dans le cadre d'une rénovation, il n'est pas toujours facile de choisir l'emplacement optimal du monobloc où se trouve les conduites d'air fournis et d'air rejeté d'une installation de ventilation simple. Il existe d'autres solutions permettant la transition dans l'épaisseur des planchers pour les distributions horizontales, ou alors dans des faux plafonds quand la hauteur d'étage le permet. Mais ses solutions ont plusieurs répercussions sur les caractéristiques de la construction. De même pour la circulation verticale qui peut s'intégrer dans les ossatures bois ramené en façade et de nombreux autres produits proposé par des professionnels sur le marché (Markus, Lucie, PFLUG, & Bettina, 2014).

II.12. Systèmes de chauffage

Il est fondamental de bien dimensionner le système de chauffage pour apporter l'efficacité la plus optimale et éviter les déperditions excessives du système. Il s'agit de bien choisir les ressources énergétiques renouvelables pour procurer l'apport électrique nécessaires

pour le fonctionnement des installations techniques, ainsi que pour l'eau chaude sanitaire (Markus, Lucie, PFLUG, & Bettina, 2014).

II.12.1. Pompe à chaleur (PAC)

Ce système consiste à tirer des apports de chaleur d'un milieu extérieur d'une basse température (sous-sol, cour d'eau...) et l'amener là où on veut chauffer grâce à l'énergie thermique générée à travers le changement d'état du fluide la traversant. La figure ci-dessous présente un schéma de conception d'une PAC (François, 2017).

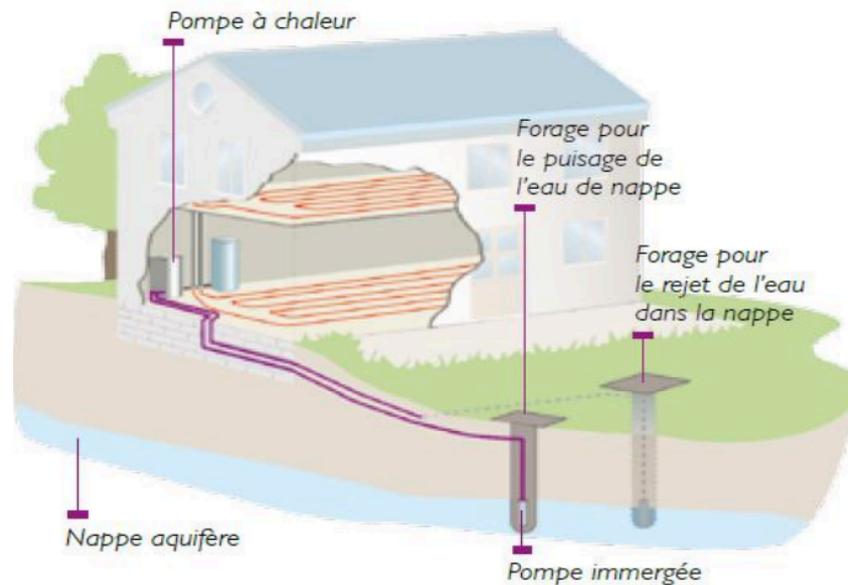


Figure 2.17 : Schéma de conception d'une PAC (François, 2017).

On voit à travers la figure que l'eau venu d'une nappe aquifère est aspiré grâce à une pompe immergée dans un forage, puis distribué par un réseau de tuyaux qui se trouve dans les planchers chauffant, puis rejeté dans la même nappe (François, 2017).

II.12.2. Solaire thermique et photovoltaïque

Il est efficace d'intégrer des systèmes de capteurs solaire en toiture afin de produire de l'électricité ou de la chaleur. Dans le cadre d'une rénovation, une intervention peut être envisager sur la toiture pour mieux orienter le système de captage. La solution la plus optimale est d'intégrer une série de capteurs photovoltaïques sur une toiture plate et les orientés au sud.

Lors de leur conception, il faut prévoir l'accès à celles-ci pour leur entretien, ainsi que prendre en compte des masques solaires comme les bâtiments ou les arbres pour optimiser son dimensionnement (Markus, Lucie, PFLUG, & Bettina, 2014).



Figure 2.18 : Intégration d'un panneaux semi transparents de MSK en façade (Markus, Lucie, PFLUG, & Bettina, 2014).

Tel que le montre la figure, il est possible de prévoir des panneaux photovoltaïques ou des stores photovoltaïques en revêtement de façade, ou alors comme brise soleil placé au-dessus des baies qui sont exposées à un fort ensoleillement. Ils peuvent être transparents ou translucides (Markus, Lucie, PFLUG, & Bettina, 2014).

II.13 Protections solaires :

Améliorer le bilan thermique en période hivernale implique une augmentation des apports solaires à travers les grandes ouvertures (les vitrages). Or ces derniers deviendront des points faibles en période estivale. Pour remédier à tout cela il faut prévoir une protection solaire extérieure au droit des fenêtre (ouvert, brise soleil, balcon, vitrages antisolaire, store à lamelles orientables, volets classique...etc.). Comme les critères de protection solaire durant la période hivernale se diffèrent de ceux de la période estivale, il est préférable d'étudier chaque façade dans son contexte pour des solutions adéquates et optimales. Il faut noter également que ces protections influencent l'aspect architecturale (Markus, Lucie, PFLUG, & Bettina, 2014).

Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté l'approche de la rénovation thermique et sa contribution dans la réduction de la consommation énergétique, lors des travaux ainsi que lors de la vie du bâtiment. Nous avons introduit aussi les techniques de rénovation au niveau de différents composants de la construction. Afin d'étudier le comportement thermique et

l'efficacité énergétique des bâtiments, et de tirer des constats à leur propos, nous allons effectuer dans ce prochain chapitre une étude quantitative et qualitative sur terrain sur deux cas d'études, soit deux immeubles de bureaux avec de différentes compositions de parois extérieures.

CHAPITRE III :
ÉTUDE SUR TERRAIN QUANTITATIVE ET
QUALITATIVE

Introduction

Dans ce chapitre nous allons étudier le confort thermique des occupants de deux immeubles de bureaux situés à la ville de Bejaïa à travers une analyse de leur efficacité énergétique en effectuant une étude empirique quantitative qui consiste à prendre des mesures de températures et d'humidités de différents bureaux durant une journée chaude puis les interpréter, ainsi qu'une étude empirique qualitative qui consiste en un questionnaire administré dédié aux occupants de ces mêmes bureaux pour mieux cerner les problèmes liés au confort thermiques.

III.1 Étude empirique quantitative

Nous avons effectué une étude empirique quantitative à propos de deux cas d'étude, afin de récolter des résultats fiables sur le confort thermique sous l'interaction de tous les facteurs.

III.1.1 Présentation de la ville de Bejaïa et son climat

Bejaia se situe au Nord-est de l'Algérie, à 230 Km de la capitale Alger. C'est une ville côtière en bordure de la mer Méditerranée, avec une façade maritime qui s'étale jusqu'à environ 100 Km.

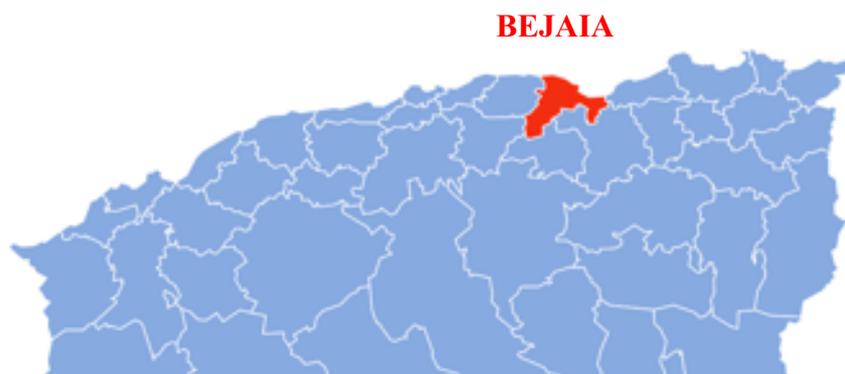


Figure 3.1 Situation de la ville de Bejaia par rapport au littoral Algérien (Adapté par l'auteur)

(<https://fr.wikipedia.org/>)

III.1.2 Climatologie de la ville de Bejaïa

Selon la classification du climatologue et botaniste Koppen Geiger, la ville de Bejaïa est connue par un climat méditerranéen de type Csa, avec un hiver doux (une température minimale d'environ 5°C et une température maximale d'environ 20 °C) et pluvieux, et un été sec et chaud (une température minimale d'environ 18°C et une température maximale d'environ 34°C) comme le montre le graphe ci-dessous qui exprime le changement de température et de météo de la ville de Bejaïa entre 2015 et 2021(<http://hikersbay.com/> ; Climatic Classification Of Koppen).



Figure 3.2 : Météo et Moyenne des températures mensuelles à Bejaïa 2015 – 2021 (<http://hikersbay.com/>)

La région de Bejaïa reçoit la plupart du temps des vents modérés avec une dominance des vents soufflants venant d'Ouest à Sud-Ouest (43,6%) (DJERROUD & MAKHLOUFI, 2019).

Cette ville subit un balancement entre une circulation polaire pendant l'hiver et une circulation de l'air saharien pendant l'été, expliquant un climat aride durant l'été, et tempéré humide durant l'hiver (FARAH, 2014).

III.2 Présentation des cas d'études

Nous avons choisi deux immeubles administratifs au sein de la ville de Bejaïa pour étudier leur confort thermique ainsi que leur efficacité énergétique. Les deux bâtiments se trouvent à différentes altitudes et de différentes compositions de parois, ainsi on pourra étudier plusieurs comportements thermiques et les comparer entre eux.

III.2.1 Projet 01 : Le bloc administratif

Notre premier cas d'étude se situe à la wilaya de Bejaïa. Il abrite plusieurs services, parmi eux le COWEFD et la direction des équipements publics. Ci-contre, une vue aérienne sur le bloc administratif ainsi que la course du soleil tirée du site sunearthtools.com.

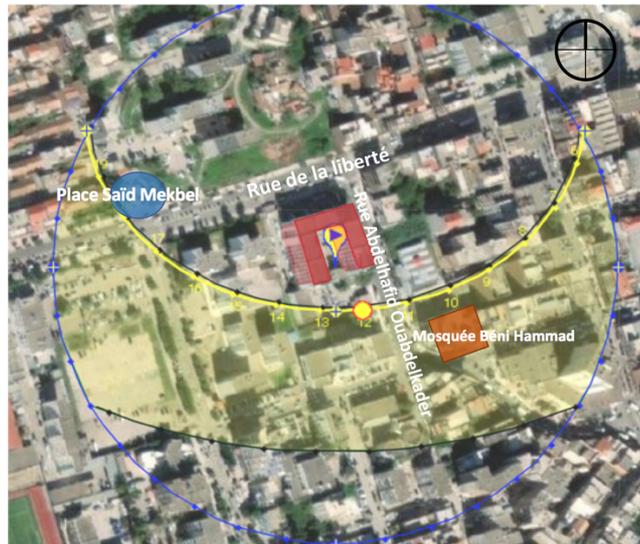


Figure 3.3 : Vue aérienne sur le cas d'étude 01. (Source : <https://www.sunearthtools.com/>)

Adapté par l'auteur, 2021)

Le bâtiment est orienté Nord-Ouest comme le montre la figure ci-dessus. Il est d'une superficie de 1226 m². Le bloc administratif est situé dans une zone urbaine, entouré d'équipement de différentes vocations tel que le montre la figure.

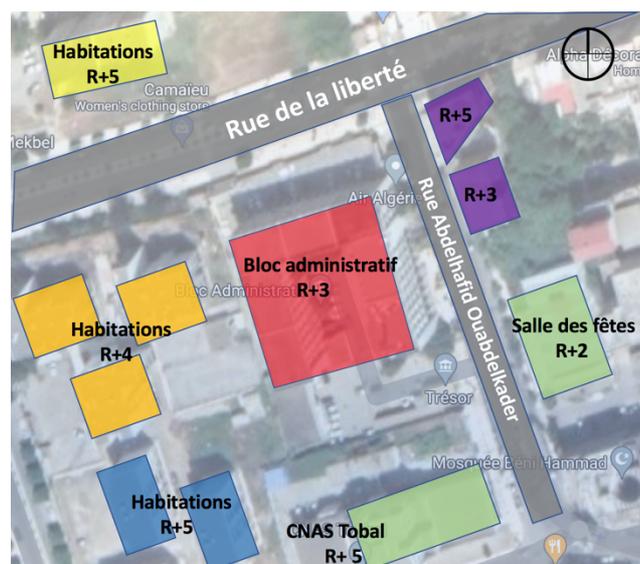


Figure 3.4 : Plan masse du Bloc administratif (Auteur, 2021)

Le bloc administratif est entouré de construction de gabarie variant entre R+2 (salle des fêtes à sa droite) et R+5 (Habitations à sa gauche et en face, et CNAS Tobal par en bas). Ci-contre une vue sur le bloc administratif.



Figure 3.5 : Vue sur le Bloc administratif (Auteur, 2021)

Le volume de ce bloc est de forme U. Il est constitué de trois étages ainsi que deux autres en sous-sols. Des éléments de protection solaire verticale viennent se mettre sur la façade principale, et continue jusqu'au sol pour former une galerie en rez-de-chaussée tel que apparaît sur la vue.

III.2.1.1. La composition des parois

Les parois extérieures du bloc sont d'une largeur de 30 cm, composées de brique creuse et une lame d'air de 5 cm comme isolation pour la paroi. Une vue de coupe sur cette paroi du bloc administratif est illustrée sur la figure 3.6. Les parois intérieures sont composées de brique creuse de 10 cm. Le bloc est doté de fenêtres ouvrantes avec deux vantaux sans protection solaire.

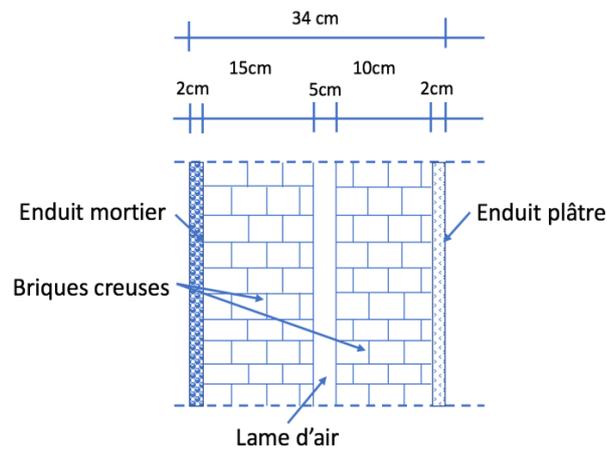


Figure 3.6 : Vue de coupe sur la paroi extérieure du cas d'étude 01 (Source : D.T.R, 1997 ; Adapté par l'auteur, 2021)

Le schéma illustre les différentes couches de la paroi extérieure en brique creuse. Les caractéristiques thermiques des différents matériaux qui la composent sont illustré sur le tableau 3.1.

Tableau 3.1 : Caractéristiques thermiques des matériaux qui composent la paroi extérieure du cas d'étude 01 (Source : D.T.R, 1997 ; Adapté par l'auteur, 2021)

Matériau /Paramètre	Conductivité thermique (W/m.k)	Capacité thermique (J/kg. °C)	Masse volumique (kg/m ³)
Enduit de plâtre	0,57	936	1150
Enduit de ciment	0,80	1080	1900
Brique creuse	0,39	936	650
Lame d'air	0,047		1

À travers le tableau nous concluons que la brique creuse n'a pas une bonne performance thermique vue sa conductivité thermique très élevé et donc sa résistance thermique est très faible.

III.2.1.2. Les installations techniques :

Ce cas d'étude dispose de plusieurs installations techniques de chauffage et de climatisation.

Pour chauffer les bureaux, les fonctionnaires utilisent un chauffage bitube, qui est le mode d'alimentation le plus utilisé. Une eau chaude est conduite jusqu'aux radiateurs, dans un autre circuit l'eau refroidie est conduite à la chaudière qui consomme du gaz naturel qui une énergie fossile. Tous les bureaux sont équipés d'un corps de chauffage.

Quant à la climatisation, la plupart des bureaux sont équipé d'un climatiseur individuel de type split constitués d'une unité intérieure plus compacte et d'une unité extérieure.

III.2.2. Projet 02 : la direction des travaux publics DTP de Bejaïa

Notre deuxième cas d'étude se situe aussi à la wilaya de Bejaïa. Il se trouve à l'ancienne ville, sur le Boulevard des frères Bouaouina. Ci-contre, une vue aérienne sur la DTP ainsi que la course du soleil tiré du site sunearthtools.com.



Figure 3.7 : Vue aérienne sur le cas d'étude 02. (Source : <https://www.sunearthtools.com/>)

Adapté par l'auteur, 2021)

Le bâtiment est orienté Nord-Est comme le montre la figure ci-dessus. La DTP de Bejaïa est situé dans une zone urbaine, entouré d'équipement de différentes vocations tel que le montre la figure 3.8.

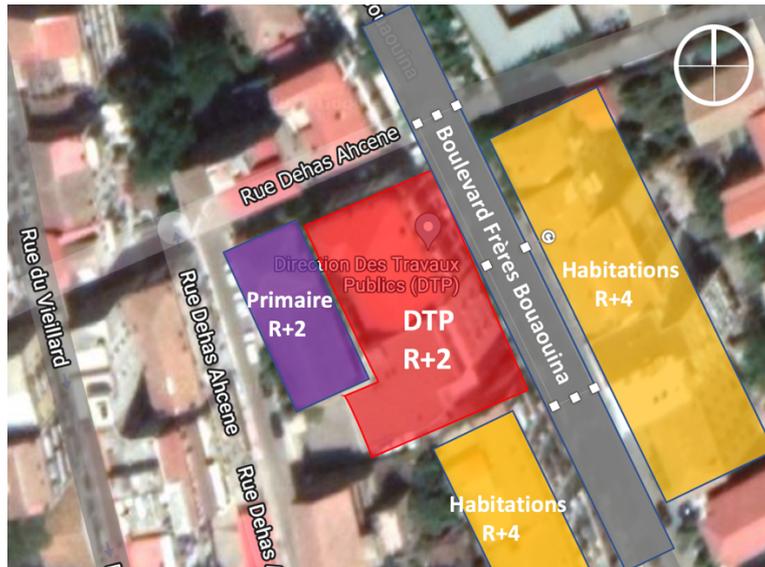


Figure 3.8 : Plan masse de la DTP de Bejaïa

La direction des travaux publics est entourée de construction de gabarie variant entre R+2 (primaire par derrière) et R+4 (Habitations à sa droite et en face). Ci-contre une vue sur la DTP de Bejaïa.



Figure 3.9 : Vue sur la DTP de Bejaïa (Auteur, 2021)

La vue sur le bâtiment de la DTP (figure 3.9) montre les deux parties par laquelle est constitué ce dernier, construites à de différentes périodes ; une ancienne partie (partie droite), et une nouvelle partie jointe à l'ancienne. Le bâtiment est constitué de deux étages ainsi que deux autres en sous-sols. L'ancienne partie est dotée de fenêtres ouvrantes en verre simple avec

triple vantaux mesurant 1m60 chacune, et sans. La nouvelle partie est dotée de fenêtres ouvrantes.

III.2.2.1. La composition des parois :

Les parois extérieures de la nouvelle partie de la DTP sont d'une largeur totale de 34 cm, composées de brique creuse et une lame d'air de 5 cm comme isolation pour la paroi. Les parois intérieures sont composées de brique creuse de 10 cm. Les parois extérieures de l'ancienne partie sont faites de pierre et mesure 70 cm. Ils ne contiennent pas de couche d'isolation.

La nouvelle partie du bâtiment est dotée de fenêtres à vantaux en PVC de 2 m, tandis que ceux de l'ancienne partie sont en bois et mesurent 1m60. Toutes les fenêtres du bâtiment ne profitent pas de protection solaire. Une vue de coupe sur cette paroi est illustrée sur la figure 3.10.

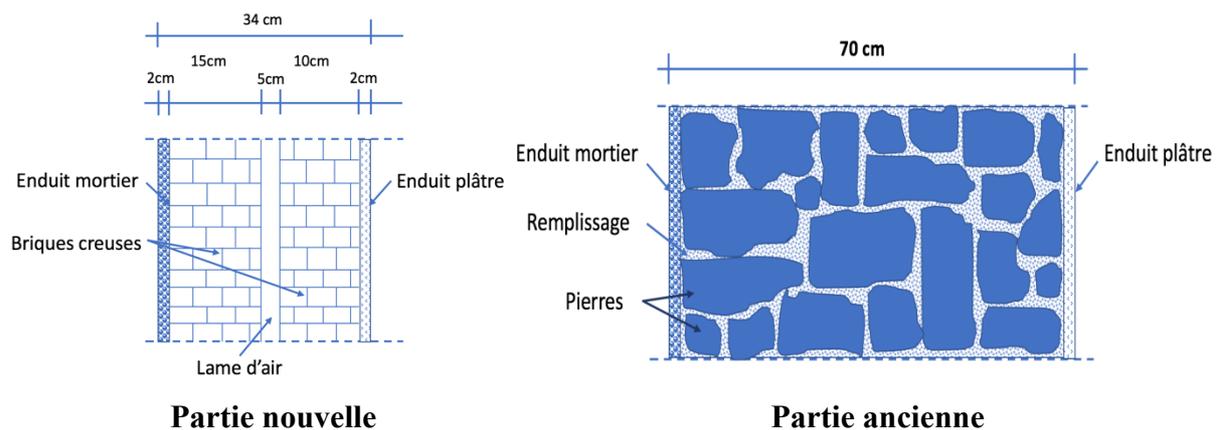


Figure 3.10 : Vue de coupe sur les parois extérieures des deux parties de la DTP (Source : D.T.R, 1997 ; Adapté par l'auteur, 2021).

Le schéma a illustré les différentes couches des parois extérieures en brique creuse et en pierre. Les caractéristiques thermiques des différents matériaux qui les composent sont illustrés sur le tableau 3.2.

Tableau 3.2 : Caractéristiques thermiques des matériaux qui composent les parois extérieures du cas d'étude 02 (Source : D.T.R, 1997 ; Adapté par l'auteur, 2021)

Matériau /Paramètre	Conductivité thermique λ (W/m.k)	Capacité thermique (J/kg. °C)	Masse volumique (kg/m³)
Enduit de plâtre	0,57	936	1150
Enduit de ciment	0,80	1080	1900
Pierre dure	2,4	936	2350-2580
Brique creuse	0,39	936	650
Lame d'air	0,047		1

III.2.2.2 Les installations techniques

Ce cas d'étude dispose d'un système de chauffage centrale qui fonctionne à travers une chambre de chaudière qui diffuse de la chaleur aux radiateurs dans les différents bureaux du bâtiment. La plupart des bureaux sont équipé d'un climatiseur individuel de type split constitués d'une unité intérieure plus compacte et d'une unité extérieure.

III.3. Protocole et instrument de prise de mesure

Dans le cadre d'une analyse thermique du bâtiment bloc administrative de Bejaïa, et de la direction des travaux publics de Bejaïa pour évaluer l'efficacité de leurs compositions de parois, nous avons opté pour des mesures prises in situ de température de quelques bureaux des deux cas d'études pendant la période estivale à l'aide d'un thermomètre hygromètre numérique LCD intérieur / extérieur – Ta138 durant quatre moments différents de la journée ; à savoir 8 heures, 10 heures, 13 heures, 16 heures, lors d'une journée chaude (avec une température maximale de 28°C et une température minimale de 19°C) étant la journée la plus chaude de la première semaine du mois de juin. Les températures mesurées sont la température extérieur (T°C extérieur) ainsi que la température intérieure des bureaux choisis (T°C bureau).

Nous avons effectué la prise de mesure le 01 juin 2021 qui est une journée ensoleillé, dans les conditions naturelles des bureaux, où les portes et les fenêtres sont fermé et aucun système de climatisation ou de chauffage n'est mis en marche. Ci-dessous une photo de l'appareil de prise de mesure.



Figure 3.11 : Thermomètre hygromètre numérique LCD intérieur / extérieur – Ta138 (JUMIA, 2021)

III.3.1. Le choix des points de mesures du cas d'étude 01

Pour le cas d'étude 01, nous avons choisi des bureaux qui se trouve sur un étage courant qui est le deuxième étage, pour minimiser les éléments influant sur la température de ces derniers, et mieux étudier l'influence de la composition des parois. A savoir que nous n'avons pas eu accès aux dossier graphique du cas d'étude, le schéma ci-dessous a été effectuer à travers un levé topographique.

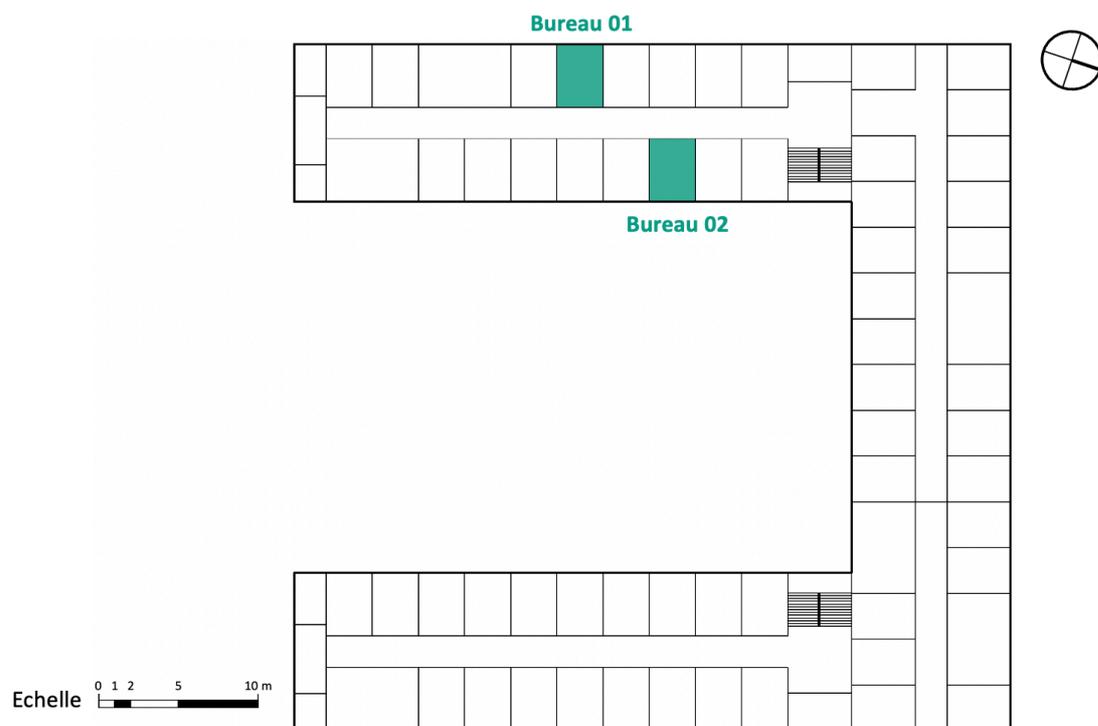


Figure 3.12 : Situation des points de mesures du Bloc administratif (Auteur, 2021).

Le tableau qui suit apportera plus d'informations sur chacun des bureaux 01 et 02.

Tableau 3.3 : Les spécificités de chaque bureau du cas d'étude 01 (Auteur, 2021)

	Orientation	Surface	Nombre d'occupants	Nombre d'ordinateurs	Nombre de fenêtres
Bureau 01	Sud-ouest	S = 11,6 m ²	1	1	1
Bureau 02	Sud-est	S = 11,6 m ²	1	1	1

Les deux bureaux sont orientés vers de différentes orientations, avec une surface et nombre d'occupants et nombres d'ordinateurs et nombre de fenêtres identiques.

III.3.2. Le choix des points de mesures du cas d'étude 02

Pour le cas d'étude 02, nous avons choisi deux bureaux, l'un se trouve dans la partie nouvelle et l'autre dans la partie ancienne. Tous les deux sont situés sur le même étage courant qui est le premier étage donnant sur la même façade qui est la façade principale, et avec des surfaces plutôt égales. Le choix à tenue compte de choisir deux bureaux ayant comme seul différence la composition de parois, afin de pouvoir comparer entre le comportement de ces dernières. A savoir que nous n'avons pas eu accès aux dossier graphique du cas d'étude, le schéma ci-dessous a été effectuer à travers un levé topographique.

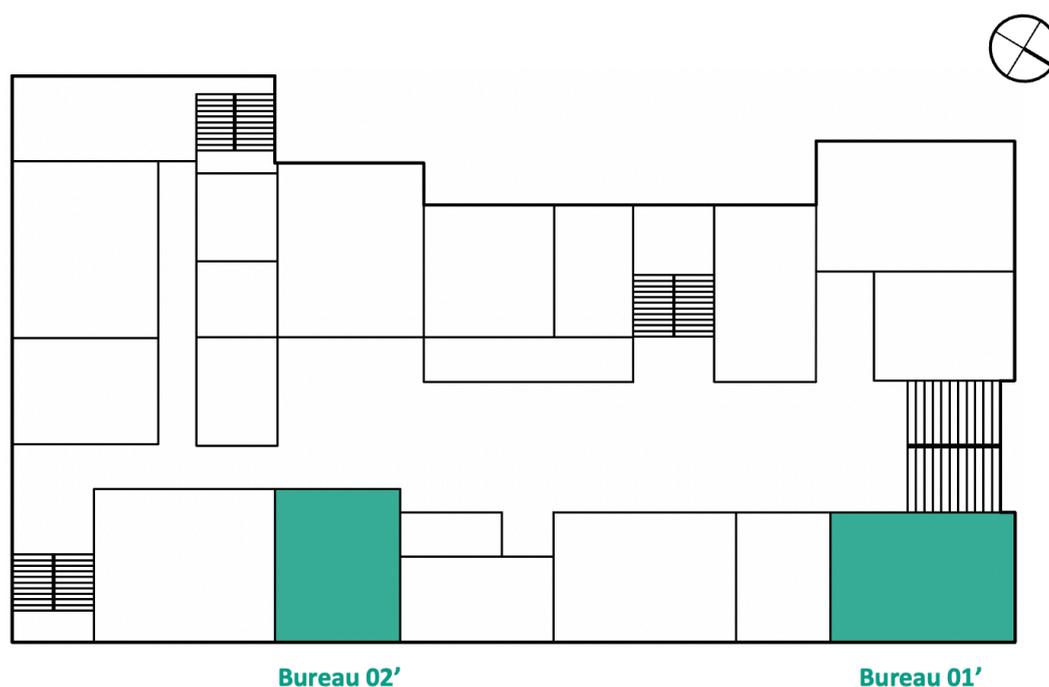


Figure 3.13 : Situation des points de mesures de la DTP de Bejaïa (Auteur, 2021).

La figure montre que le bureau 1' dispose de deux façades ayant un contact direct avec l'extérieur, pendant que le bureau 2' dispose d'une seule façade exposée directement à l'extérieur.

Le tableau qui suit apportera plus d'informations sur chacun des bureaux 01 et 02.

Tableau 3.4 : Les spécificités de chaque bureau du cas d'étude 02 (Auteur, 2021)

	Orientation	Surface	Nombre d'occupants	Nombre d'ordinateurs	Nombre de fenêtres
Bureau 01'	Nord-est / Nord-ouest	$S \approx 30 \text{ m}^2$	1	1	3
Bureau 02'	Nord-est	$S \approx 27 \text{ m}^2$	3	3	2

Les deux bureaux sont d'une surface plutôt équivalente, et un nombre d'occupants et nombres d'ordinateurs et nombre de fenêtres différents.

III.4. Résultat et interprétation des mesures in situ

Les résultats obtenus par la prise de mesures sont représentés dans les figures 3.14, 3.15, 3.16 et 3.17. Chacune des figures illustre la température intérieure du bureau choisis ($T^{\circ}\text{C}$ bureau) ainsi que la température extérieure ($T^{\circ}\text{C}$ extérieur).

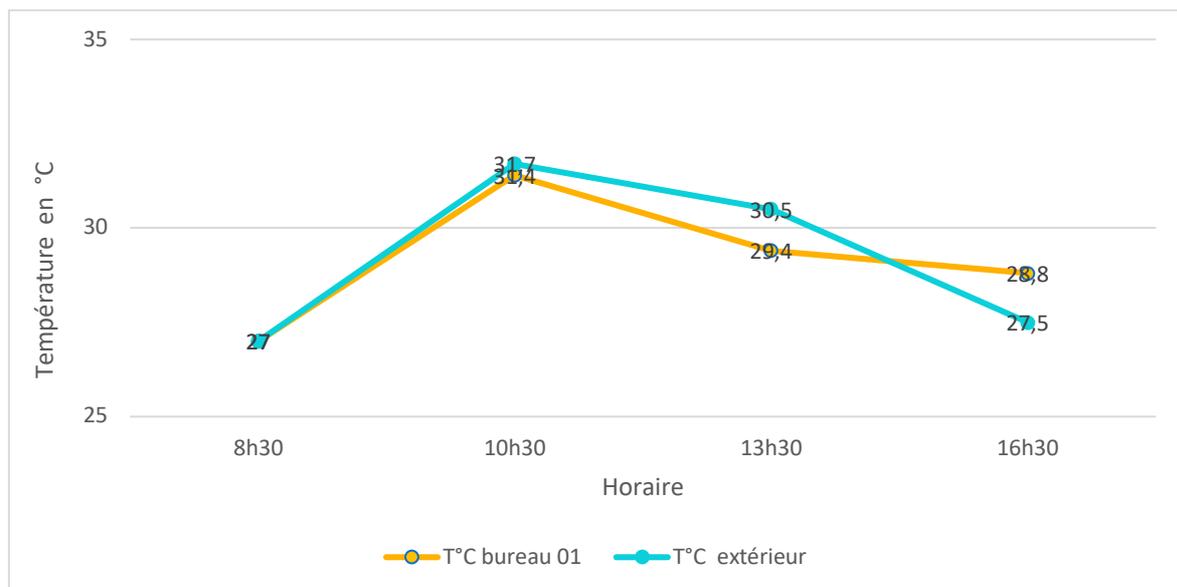


Figure 3.14 : Les températures prise au sein du bureau 01 du bloc administratif (Source : Auteur, 2021)

Le graphe de la Figure 3.14 présente les températures mesurées ($T^{\circ}\text{C}$ bureau et $T^{\circ}\text{C}$ extérieur) dans le bloc administratif. On remarque que la température intérieure et extérieure sont identiques en début de journée à 8h (27°C). Les deux températures augmentent avec une légère différence entre elles jusqu'à atteindre $31,7^{\circ}\text{C}$ à l'extérieur et $31,4^{\circ}\text{C}$ à l'intérieur à 10h30. À 13h30 la température extérieure baisse, celle de l'intérieur du bureau baisse légèrement plus (une différence de $1,1^{\circ}\text{C}$). En fin journée de travail la valeur des deux températures continue à baisser et restent proche l'une par rapport à l'autre, la température intérieure à cette heure étant supérieure que la température extérieure (une différence de $1,3^{\circ}\text{C}$).

On remarque que la température extérieure et intérieure on était proche et même identique parfois durant toute la journée, qui est une orientation recevant beaucoup

Cette paroi a prouvé son inefficacité face aux d'apport solaire reçu durant une longue période de la journée, ce bureau étant orienté sud-ouest. Elle ne s'est pas opposé aux apports thermiques. On dira alors que ce bureau ne présente pas de confort thermique en présence de chaleur, car les valeurs de températures du bureau étaient en dehors de l'intervalle de la zone de confort qui de 18°C à 25°C pendant toutes la journée de travail.

Le graphe de la Figure 3.15 présente les températures mesurées ($T^{\circ}\text{C}$ bureau 02 et $T^{\circ}\text{C}$ extérieur) dans le bloc administratif.

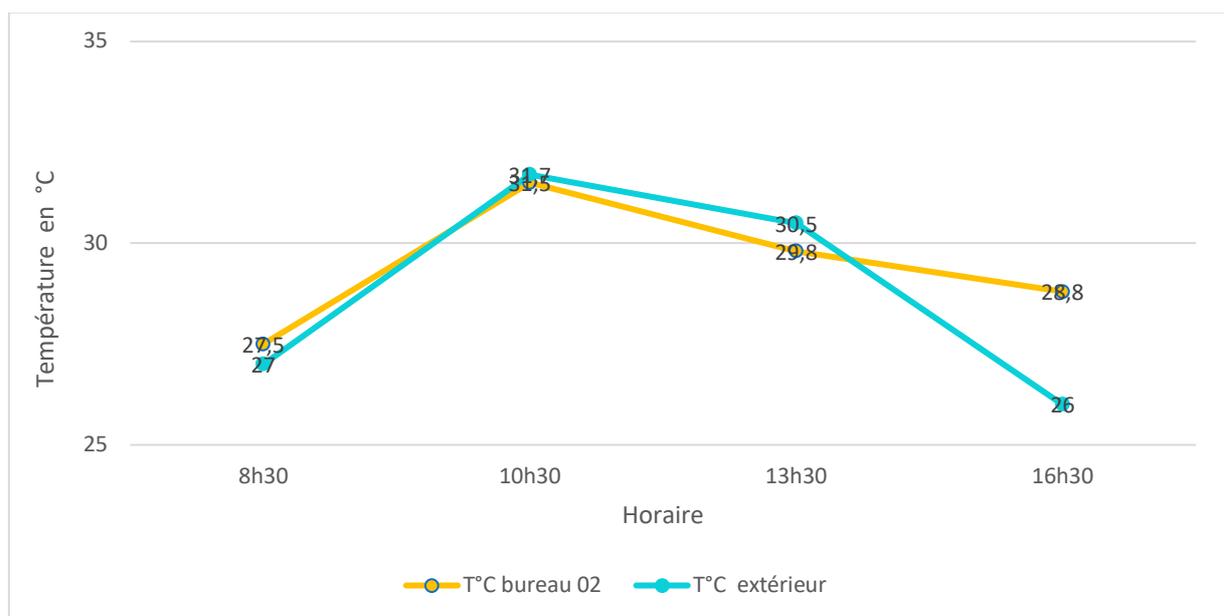


Figure 3.15 : Les températures prise au sein du bureau 02 du bloc administratif (Source : Auteur, 2021)

On constate que les deux températures sont voisines tout le long de la journée avec un écart de 2,5 °C au maximum entre elle. Ce dernier fut en fin journée de travail, (T°C bureau 02) étant la plus élevée. Cela peut s'expliquer par l'inefficacité de la paroi face aux apports solaires reçu toute la journée de l'orientation sud-est, malgré la présence de protection solaire verticale tout le long des façades. Toutes les températures sont supérieures au seuil du confort thermique qui est de 25°C. On dira alors que ce bureau n'assure pas de confort thermique à ses usagers.

Le graphe de la Figure 3.16 présente les températures mesurées (T°C bureau 01' et T°C extérieur) dans la DTP de Bejaïa.

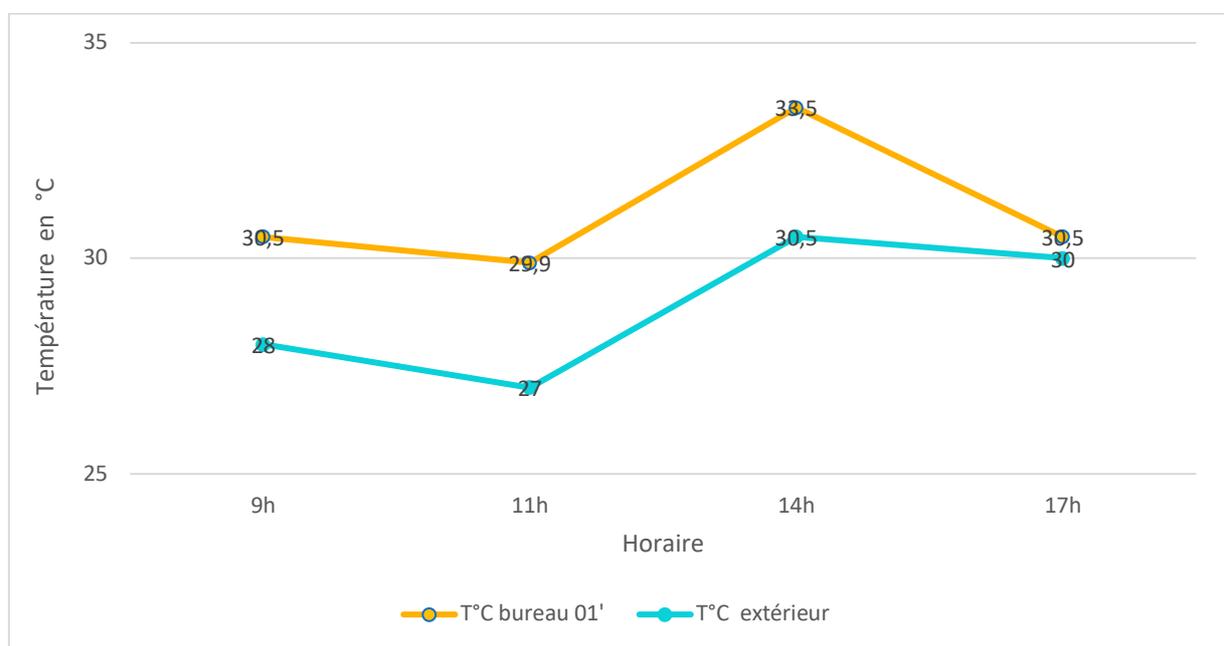


Figure 3.16 : Les températures prise au sein du bureau 01' de la DTP de Bejaïa (Source : Auteur, 2021)

D'après les températures mesurées au sein du bureau 01' qui se trouve dans la partie ancienne du bâtiment, on remarque que pratiquement toute la journée la (T°C bureau 01') est plus élevé que la (T°C extérieur) de 2°C. Ce bureau profitant de deux façades exposées vers l'extérieur, l'une orienté Nord-est et l'autre orienté Nord-ouest, ainsi que trois baies, il reçoit alors beaucoup d'apports solaires. Ce comportement explique que la paroi en pierre de 70 cm n'a pas réussi à stocker la chaleur pour la restituer plus tard. L'intérieur du bureau n'est donc pas isolé des apports solaires. Il faut noter aussi que le boulevard Frères Bouaouina est planté d'arbre à haute tiges de part et d'autre du boulevard, ce qui peut contribuer à rafraichir le

microclimat. C'est pour cela que la température extérieure qui a été prise grâce au thermomètre à partir du milieu du boulevard est plus fraîche que celle de l'intérieur.

Le graphe de la Figure 3.17 présente les températures mesurées (T°C bureau et (T°C extérieur) dans la DTP de Bejaïa.

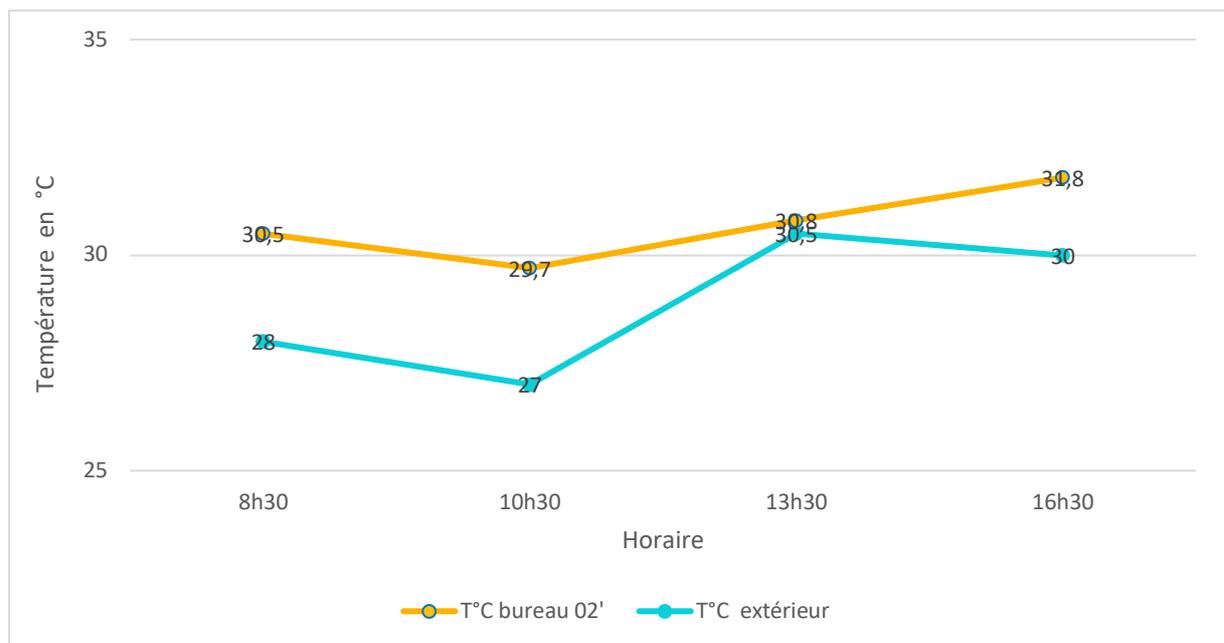


Figure 3.17 : Les températures prise au sein du bureau 02' de la DTP de Bejaïa (Source : Auteur, 2021)

Le bureau 02' qui se trouve dans la partie nouvelle connaît aussi des températures plus élevées que ceux de l'extérieur, mais légèrement moins élevées que ceux du bureau 01'. Cela peut expliquer que la paroi extérieure en brique creuse ne protège pas non plus l'intérieur des apports solaires excessifs ; rappelons que sa conductivité thermique λ est très élevée (0,39 W/m.k), ce qui influence directement sa résistance thermique qui sera dans ce cas très faible. Le flux de chaleur est donc transmis par la paroi extérieure en grande quantité malgré la présence de la lame d'air qui possède une faible transmission thermique (0,047 W/m.k). Les résultats de températures du bureau 02' présentant un minimum de confort meilleur par rapport à celui du bureau 01' ne disent rien sur la meilleure performance de la paroi en brique creuse par rapport à la pierre dure, car le bureau 01' possède plus de surface exposée à l'extérieur, et plus de fenêtres ne possédant pas de protection solaire, et donc plus d'apport solaire sont conduits à l'intérieur dans ce bureau.

D'après l'analyse du cas d'étude 01, nous concluons que celui-ci est parmi les bâtiments ayant subis un accroissement des coûts énergétiques à cause de l'isolation inadéquate de son enveloppe en plus de l'utilisation massive des équipements techniques pendant les journées d'hiver ainsi que d'été, ce qui augmente la facture énergétique de ce bâtiment. Il est donc nécessaire de diminuer les besoins en chauffage et climatisation dans ce bâtiment pour limiter les sources de déperdition, et ce, à l'aide d'une rénovation thermique qui pourra présenter une grande source d'économies d'énergie.

III.5 Étude empirique qualitative

Dans le cadre d'une analyse énergétique des deux bâtiments ; le bloc administratif de la wilaya et la direction des travaux publics, et afin de proposer des pistes d'économies d'énergie, nous tentons de poser une série de questions aux occupants des deux bâtiments pour cerner les problèmes liés au confort thermiques et à l'efficacité énergétique.

III.5.1. Protocole de distribution du questionnaire :

Le questionnaire a été distribuer sur tous les travailleurs de l'étage 01 où la prise de mesure a été effectué de manière administrative. Nous avons distribué 24 questionnaire, pour en récupérer que 22, ainsi qu'une copie pas complète. Les questions posées ont été choisis de manière à être fermé, avec des propositions de réponse bien claire et courte, afin d'être sûr de ne pas mettre les interviewés mal à l'aise aux, ainsi que pour la Rapidité d'administration et la simplicité de traitement. Les questionnaires ont été récupérer quelques minutes après leur distribution. Le questionnaire est présent en annexe A.

III.5.2. Résultat et interprétation du questionnaire

Les résultats obtenus par le questionnaire sont représentés dans les figures 3.18, 3.19, 3.20, 3.21, 3.22, 3.23, 3.24, 3.25, 3.26 et 3.27. Chacune des figures illustres la réponse des employées des bureaux à chaque question sous forme de graphes en secteurs, indiquant les pourcentages de personnes ayant choisis chaque réponse.

Le graphe de la Figure 3.18 présente les réponses à la question « Comment juger vous la température de votre bureau en été ? ».

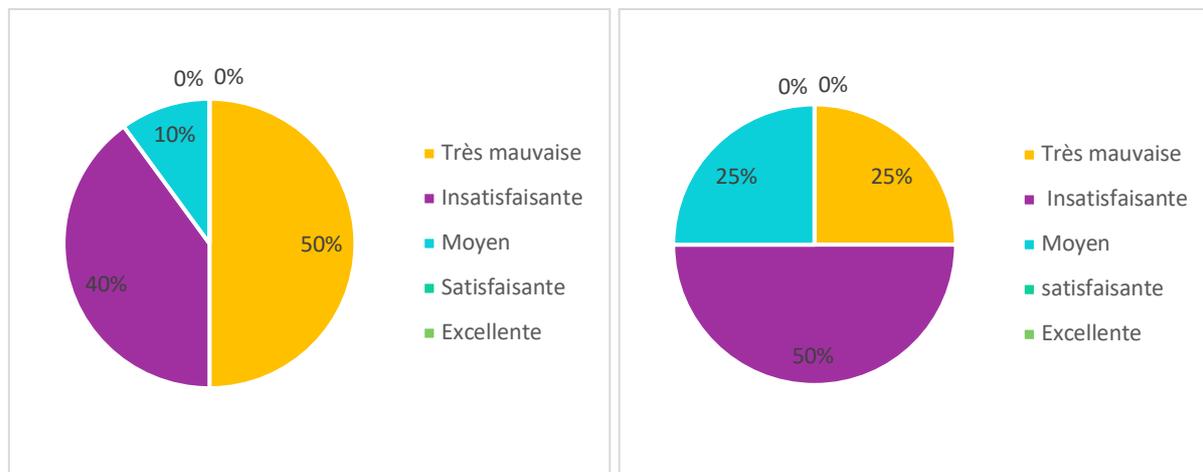


Figure 3.18 : Jugement de la température au sein des bureaux de la partie nouvelle (A) et la partie ancienne (B) pendant l'été (Auteur, 2021).

Nous remarquons qu'une grande partie des employées ne sont pas satisfaits de la température, tel que 90% des employées de la partie (A) jugent la température de leur bureau insatisfaisante, contre 75% des employées de la partie ancienne. On dira alors que le mur en pierre de 70 cm de la partie (B) est plus performant thermiquement que le mur en brique de 30 cm de la partie nouvelle, mais qui reste un pourcentage assez élevé pour juger tout le bâtiment comme un bâtiment ne présentant pas un confort thermique.

Le graphe de la Figure 3.19 présente les réponses à la question « Pour quelle solution optez-vous pour résoudre le problème de chaleur ? ».

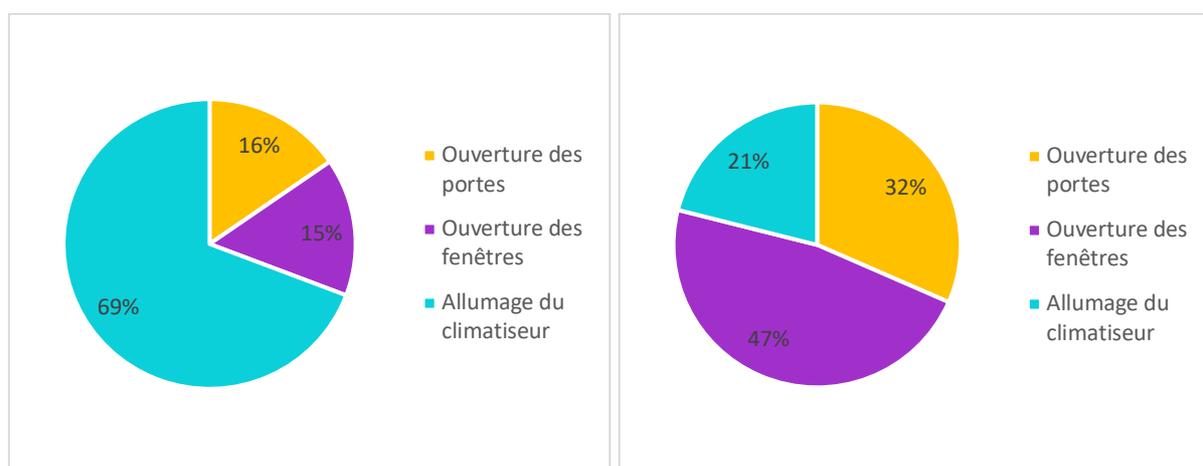


Figure 3.19 : Solution pour résoudre le problème de chaleur dans la partie nouvelle (A) et la partie ancienne (B) (Auteur, 2021).

69% des employées de la partie (A) font recoure au climatiseur pour régler les problèmes de chauffage au sein de leur bureau, tandis que 47% seulement des employées de la partie (B) le font aussi, et ce pour le fait que tous les employées ne disposent pas de climatiseur, et en réclame un pour leur extrême malaise face à la température au sein de leur bureau (des réclamations en réponse à la question 10). Un totale d'environ 59% employées dans tout le bâtiment utilise le climatiseur pour réguler la température ; on dira alors que ce bâtiment utilise des combustibles fossiles comme énergie, et n'est donc pas efficace énergétiquement.

Le graphe de la Figure 3.20 présente les réponses à la question « À quel moment de la journée optez-vous pour cette solution ? » de la partie nouvelle (A).

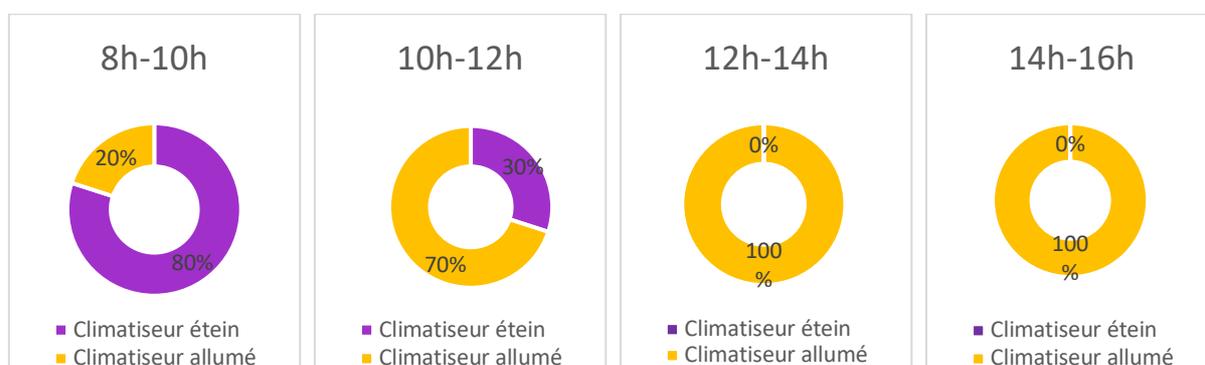


Figure 3.20 : Les horaires de recours à la solution à la chaleur de la partie nouvelle (A)

(Auteur, 2021).

Dans la partie nouvelle, 20% des employées commencent à allumer les climatiseurs à partir de leur arrivé au bureau à 8h, à partir de 12h tous les climatiseurs sont allumés jusqu'à 16h, et cela démontre que les parois extérieures de la partie (A) (en brique creuse) n'isolent pas l'intérieure des apports solaires reçue de l'extérieur, de ce fait, les employées ressentent le besoin de rafraichir leur bureau.

Le graphe de la Figure 3.21 présente les réponses à la question « À quel moment de la journée optez-vous pour cette solution ? » de la partie ancienne (B).

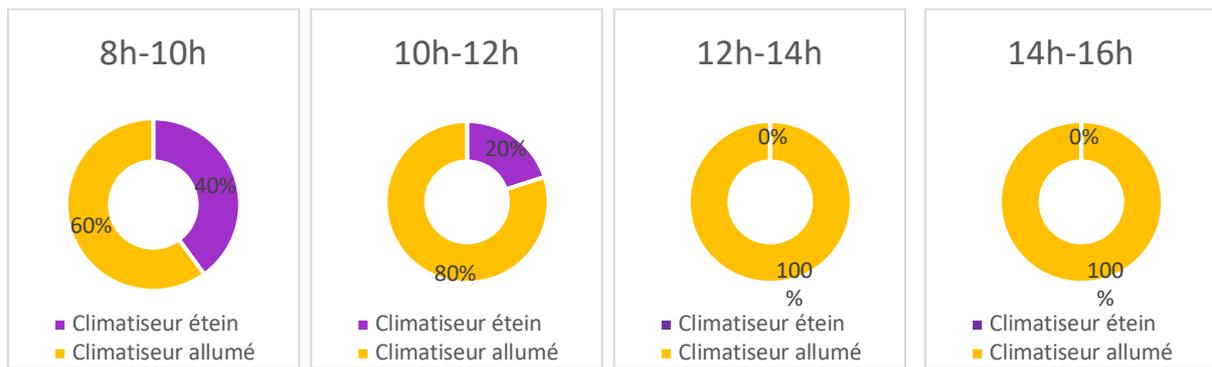


Figure 3.21 : Les horaires de recours à la solution à la chaleur de la partie ancienne (B) (Auteur, 2021).

Dans l'ancienne partie, seulement 5 employées disposent d'un climatiseur dans leur bureau, 3 parmi eux les allument à partir de 8h du matin, tandis que les deux autres les allument à partir de 12h jusqu'à la fin de la journée, ce qui démontre que les parois extérieures de cette partie (pierre de 70%) n'isolent pas non plus l'intérieure du bâtiment des apports solaire reçue de l'extérieur, les employées ressentent donc le besoin de rafraichir leur bureau.

Le graphe de la Figure 3.22 présente les réponses à la question « À quel point cette (ces) solution(s) contribue t'elle(s) à résoudre le problème de chaleur ? ».

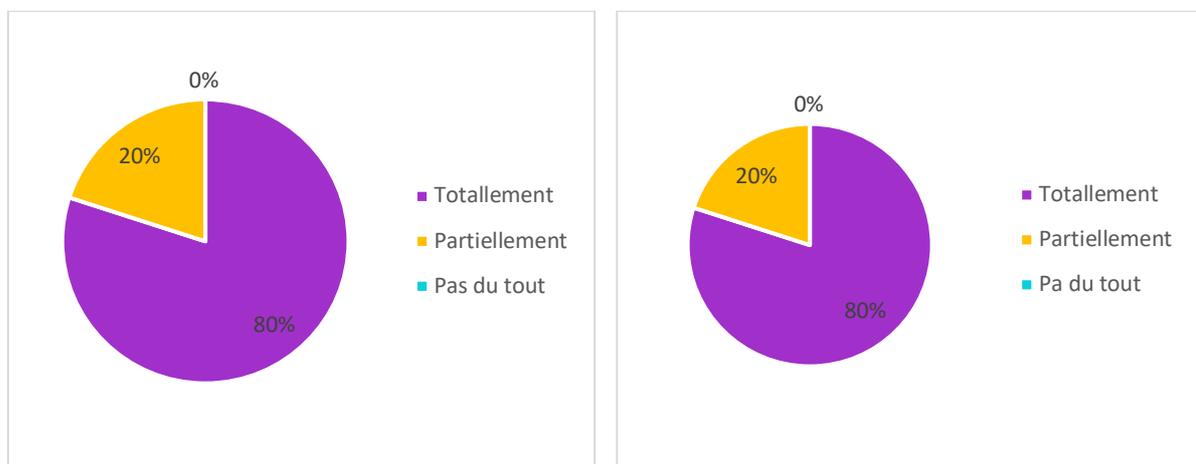


Figure 3.22 : La contribution du climatiseur dans la résolution du problème de chaleur dans la partie nouvelle (A) et la partie ancienne (B) (Auteur, 2021).

La solution du système de climatisation n'étant pas la plus optimale en termes d'efficacité énergétique, il n'a pas réussi à apporter un confort thermique suffisant chez tous les employées.

Le graphe de la Figure 3.23 présente les réponses à la question « Comment juger vous la température de votre bureau en hiver ? ».

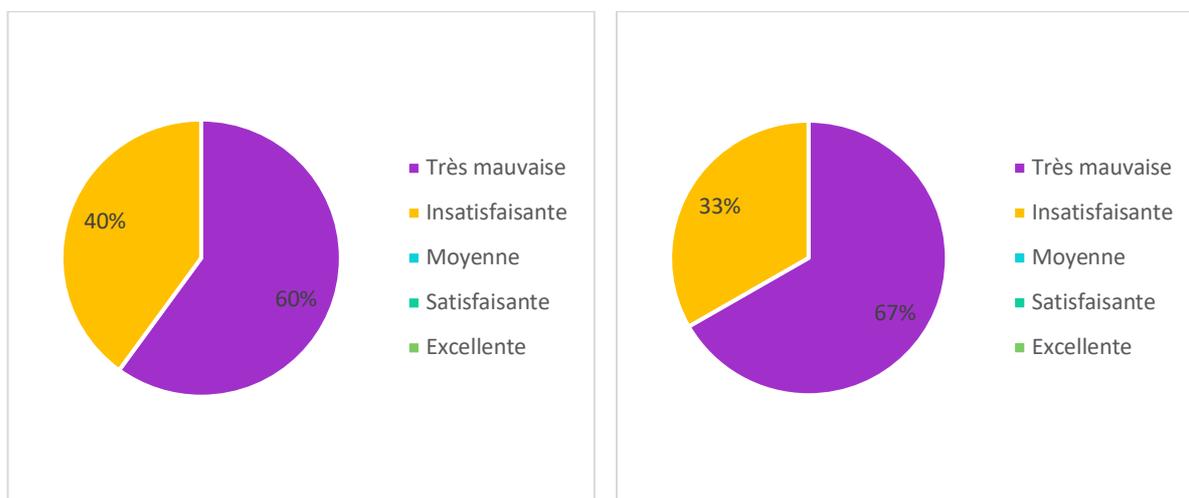


Figure 3.23 : Jugement de la température au sein des bureaux de la partie nouvelle (A) et la partie ancienne (B) (Auteur, 2021).

Tous les employés des deux parties du bâtiment jugent la température au sein de leur bureau comme très mauvaise ou insatisfaisante. Cela démontre que le confort thermique en hiver n'est pas procuré, et il l'est moins dans la nouvelle partie du bâtiment (40% réclame une très mauvaise température dans la nouvelle partie, alors que 33% seulement le réclame dans l'ancienne partie). Cela démontre que le bâtiment ne s'oppose pas aux déperditions thermiques, et donc n'assure pas un confort thermique en hiver.

Le graphe de la figure 3.24 présente les réponses à la question « Pour quelle solution optez-vous pour résoudre le problème de froid ? ».

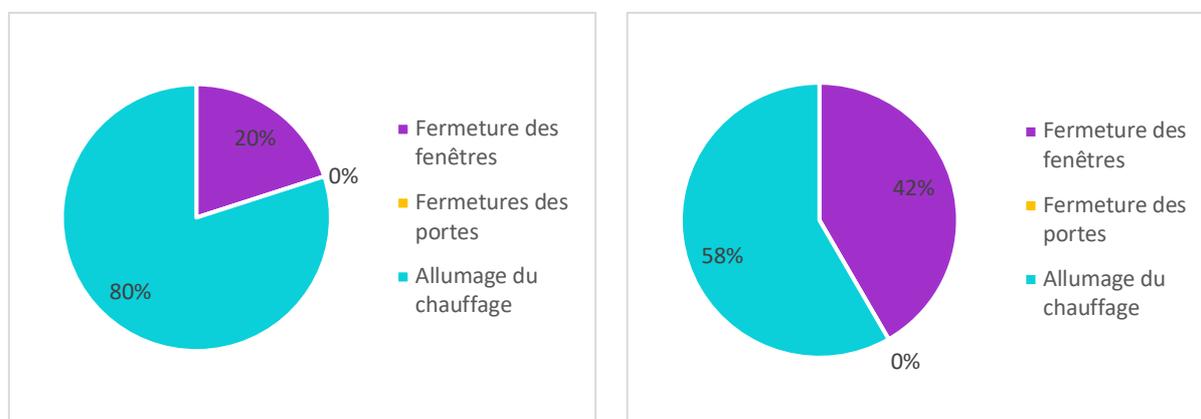


Figure 3.24 : Solution pour résoudre le problème du froid dans la partie nouvelle (A) et la partie ancienne (B) (Auteur, 2021).

Un totale de 80% des employés de la partie (A) optent pour le chauffage en période hivernale. Tandis que 58% seulement le font dans la partie (B) (42% des employés de la même partie trouve suffisant de fermer les fenêtres pour être en situation de confort)

On dira alors que l’enveloppe extérieur de la partie (B) composé de pierre dure possède une meilleure inertie que celle de la partie (A) composé de brique creuse, et moins de ponts thermiques, cela veut dire qu’elle procure moins de déperditions thermiques. Cependant celle-ci ne reste pas assez performante pour le grand pourcentage (58%) d’employés utilisant le chauffage. Ce bâtiment utilise des combustibles fossiles comme énergie en hiver, et n’est donc pas efficace énergétiquement.

Le graphe de la figure 3.25 présente les réponses à la question « À quel moment de la journée optez-vous pour cette solution ? ».

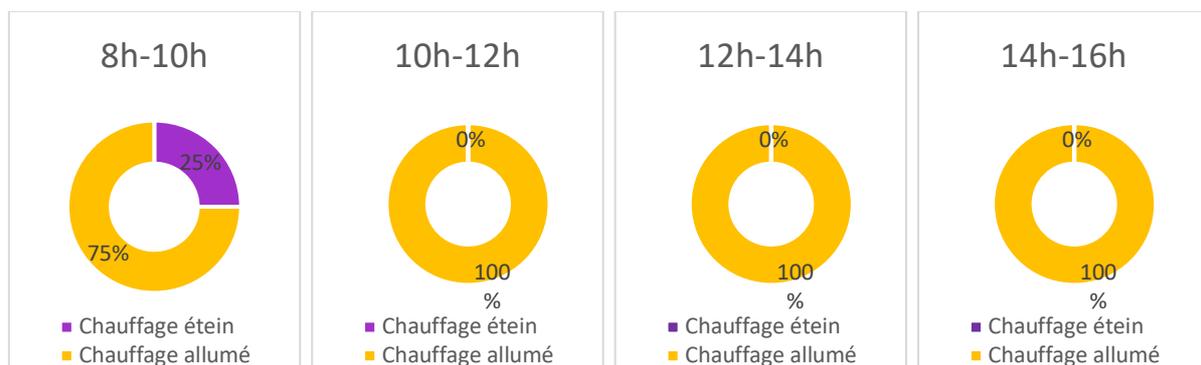


Figure 3.25 : Les horaires de recours à la solution au froid la partie nouvelle (A) (Auteur, 2021).

Nous remarquons que le chauffage dans cette partie est allumé tout le long de la journée de travail au niveau de tous les bureaux sauf 25% des employés qui l’allume à partir de 10h. cela indique que les parois de cette partie ne sont performantes en aucun moment de la journée, ainsi que le taux élevé de l’utilisation de l’énergie fossile du gaz.

La partie ancienne du bâtiment est doté d’un chauffage central qui s’allume au même temps au niveau de tous les bureaux, il est allumé tous les jours de 8h à 16h.

Le graphe de la Figure 3.26 présente les réponses à la question « À quel point cette (ces) solution(s) contribue t'elle(s) à résoudre le problème de chaleur ? ».

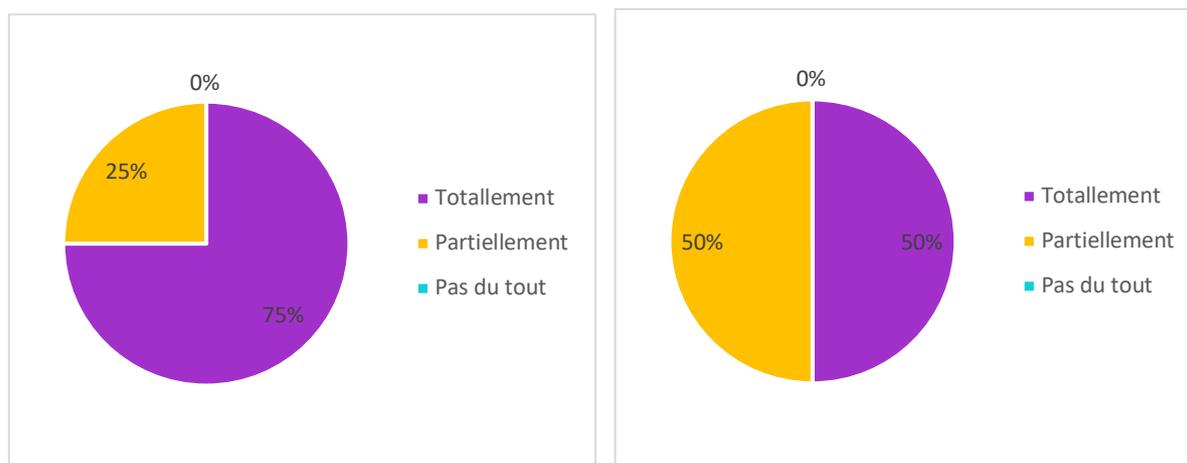


Figure 3.26 : La contribution du chauffage dans la résolution du problème de froid dans la partie nouvelle (A) et la partie ancienne (B) (Auteur, 2021).

La solution du chauffage à procurer une sensation de confort thermique chez la plupart des employées (75%) dans la partie (A), tandis que seulement la moitié des employées de la partie (B) sont satisfais du niveau de confort procurer, ce pour le fait qu'il ne contrôle pas l'allumage et l'extinction des chauffage, ni le degré d'intensité du chauffage dû au système de son fonctionnement centrale. Cette solution ne procure pas un confort thermique totale en plus de consommer de l'énergie fossile.

Le graphe de la Figure 3.27 présente les réponses à la question « Constatez-vous que l'air dans votre bureau est humide ou pas humide ? ».

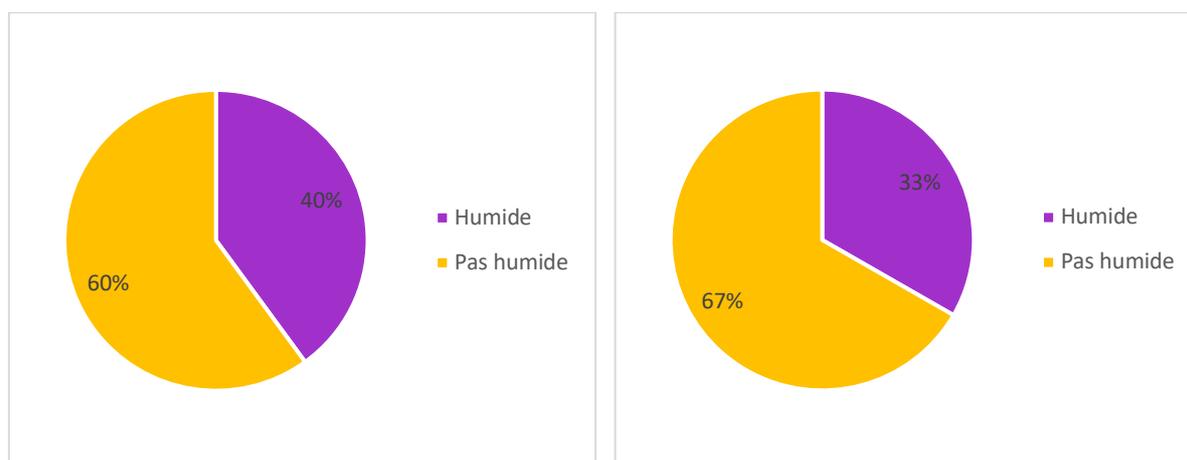


Figure 3.27 : L'humidité dans partie nouvelle (A) et la partie ancienne (B) (Auteur, 2021).

40% et 33% sont les pourcentages des personnes sentant que leur bureau est humide dans la partie (A) et la partie (B) respectivement. Cela nous apprend sur le renouvellement d'air clairement insuffisant au sein des bureaux, ce qui entraîne une sensation plus forte de chaleur en été.

L'interprétation des mesures in situ ainsi que le questionnaire ont montré que la composition de paroi en brique creuse avec lame d'air ne présente pas de bonne performance thermique, cela dit que sa capacité en termes de résistance et d'inertie ne sont pas assez forts pour acquérir un niveau de confort thermique agréable au niveau des bureaux.

Le comportement de la paroi composé de pierre dure sans aucune isolation présente un meilleur confort malgré sa conductivité thermique élevée 2,4 W/m.k, mais la pierre dure possède une grande masse volumique 2350-2580 kg/m³, c'est donc une composition qui a une grande capacité à stocker de la chaleur en son sein. Cela implique une consommation d'énergie moindre que la première composition et donc une meilleure efficacité énergétique.

Conclusion :

Ce chapitre a démontré les résultats d'une étude sur terrain par prise de mesure in situ dans deux cas d'étude réel avec des compositions de parois extérieurs différentes dans le but d'évaluer plusieurs comportements thermiques de parois. Nous avons constaté que les deux parois impliquent des besoins de refroidissement en été et de réchauffement en hiver, ce qui a une incidence notable sur la consommation énergétique, la paroi en pierre dure étant plus performante que la paroi en brique creuse.

CHAPITRE IV :
SIMULATION NUMÉRIQUE

Introduction

Dans ce chapitre nous allons effectuer une simulation numérique sur nos cas d'étude 01 qui est le bloc administratif à l'aide du logiciel *Energy Plus* pour valider les résultats trouvés dans l'étude sur terrain quantitatif, puis une deuxième simulation en proposant des solutions afin d'optimiser cette conception et d'en tirer des recommandations.

IV.1. Présentation du logiciel *Energy Plus*

Energy Plus est un logiciel de simulation énergétique du bâtiment utilisé par les architectes, les ingénieurs et les chercheurs dans le but de modéliser la consommation d'énergie ainsi que la consommation de l'eau dans les bâtiments. Plusieurs interfaces graphiques sont disponibles pour *Energy Plus* pour lire les entrées et écrire les fichiers texte, tel que Archiwizard pour lequel nous avons opter.

IV.2. Les étapes principales de travail

Nous allons voir ici les différentes étapes essentielles à l'effectuation de la simulation, jusqu'à arriver au rapport. Ci-dessous dans la figure 4.1 la première étape.

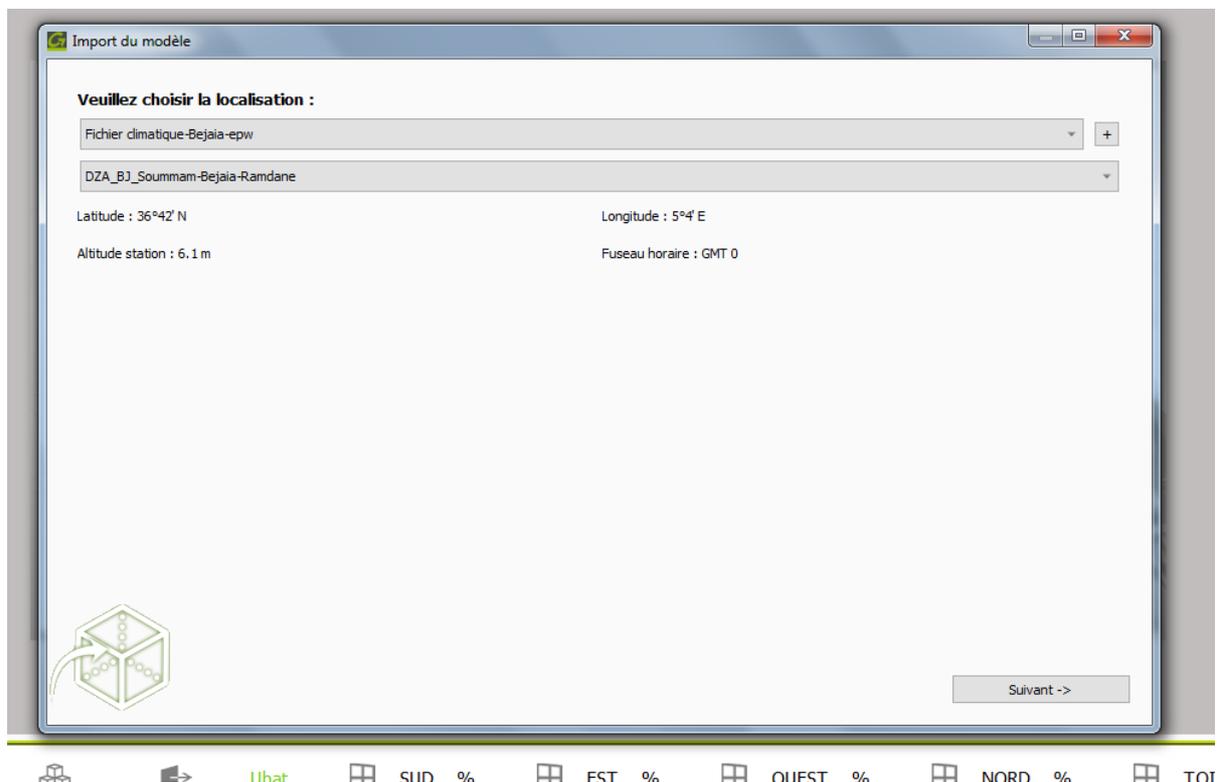


Figure 4.1 : Étape 01 de la simulation énergétique (Auteur, 2021).

Cette étape consiste en la sélection du fichier climatique de la ville où se trouve le projet voulu étudier.

La figure suivante illustre l'étape suivante de la simulation.

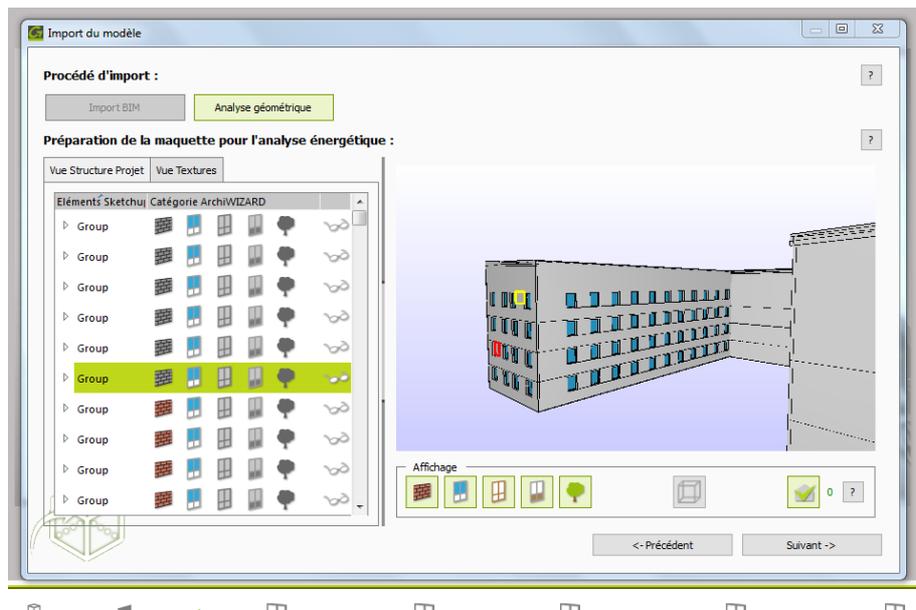


Figure 4.2 : Étape 02 de la simulation énergétique (Auteur, 2021).

Dans cette étape nous vérifions tous les éléments présents dans le projet, et leur conformité avec la lecture du logiciel.

La figure suivante illustre l'étape suivante de la simulation.

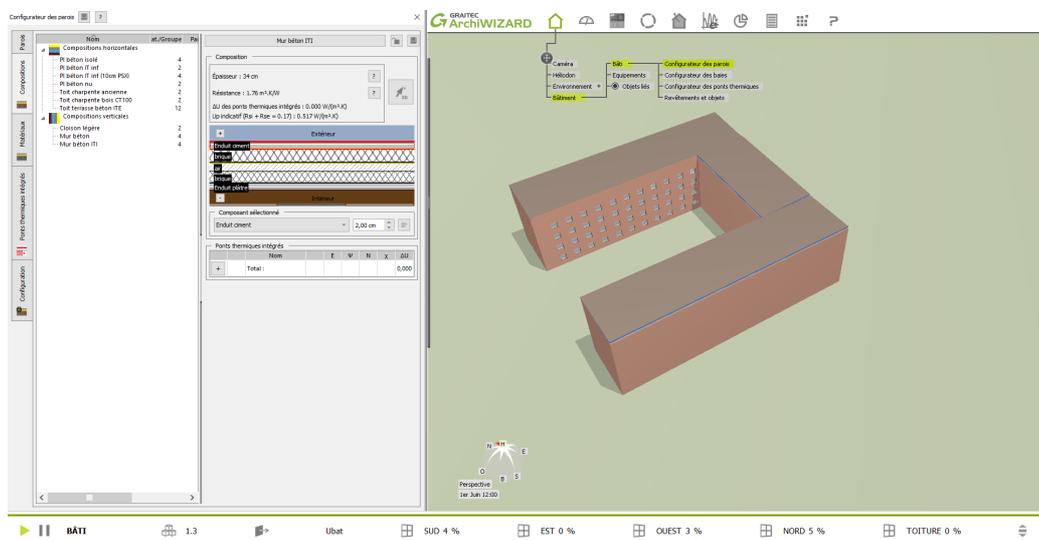


Figure 4.3 : Étape 03 de la simulation énergétique (Auteur, 2021).

Ici, nous devons changer la configuration des parois intérieures et extérieures selon les vrais matériaux utiliser dans le bloc administratif, ainsi que mettre leurs caractéristiques thermiques, leurs épaisseurs et l'ordre de leur disposition. Pour faire une optimisation du modèle, nous devons revenir à cette étape pour reconfigurer les parois.

La figure suivante illustre l'étape suivante de la simulation.

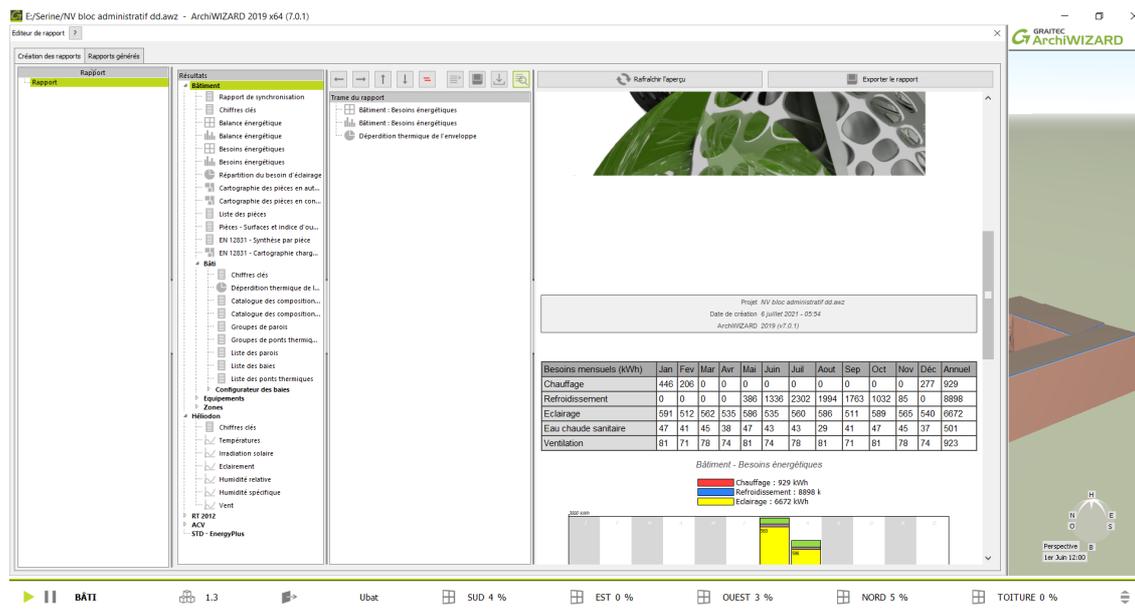


Figure 4.4 : Étape 04 de la simulation énergétique (Auteur, 2021).

En cette étape nous devons glisser les résultats voulus étudier dans une trame de rapport puis enfin exporter le rapport en un fichier PDF.

IV.3. Résultats et interprétation de la simulation du modèle réel :

Après avoir eu le rapport de simulation du modèle réel du bloc administratif, nous allons maintenant interpréter ses résultats. Ci-dessous un graphe illustrant les données de météo de températures de la ville de Bejaïa avec en gris la température de l'air et en bleu la température du ciel, durant une année.

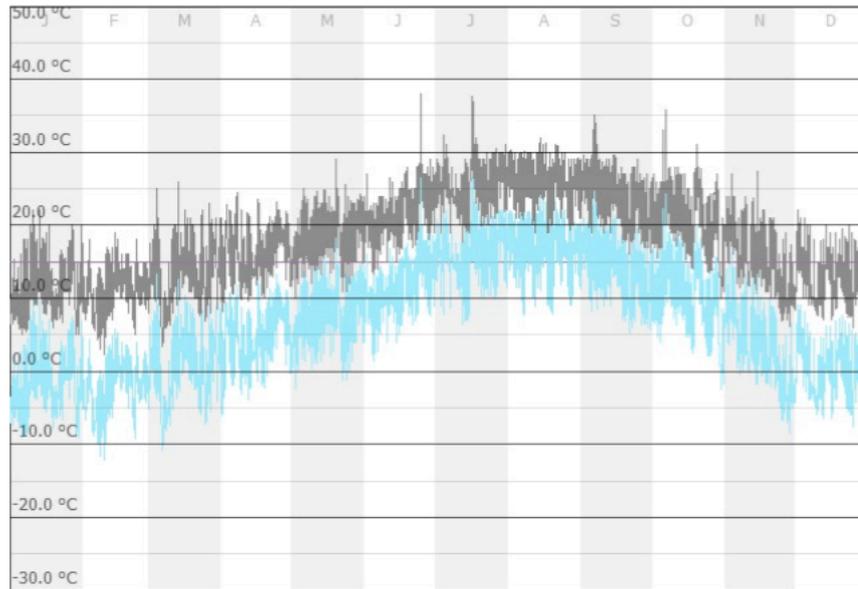


Figure 4.5 : Données de météo de températures de la ville de Bejaïa (Auteur, 2021).

Nous remarquons que la température de l'air va jusqu'à 38°C à son apogée en été (mois de juin), et baisse jusqu'à 2.3°C en hiver (mois de février). Cela nous confirme que Bejaïa est une ville avec un climat doux en hiver et chaud en été.

Nous allons voir ici-bas les différents groupes de ponts thermiques qui se trouvent dans cette construction.

Tableau 4.1 : Données de météo de températures de la ville de Bejaïa (Auteur, 2021).

Catégorie	Groupe	Longueur totale m	Ψ moyen W/(m.K)	Déperdition W/K
Plancher bas élevé / Façade	Plancher bas élevé / Façade	130.09	0.58	75.5
Plancher bas élevé / mur inf	Plancher bas élevé / mur inf	12.16	0.03	0.4
Plancher haut / façade	Plancher haut / façade	122.59	0.74	90.7
Plancher haut / mur supérieur	Plancher haut / mur supérieur	1.73	0.03	0.1
Plancher intermédiaire / façade	Plancher intermédiaire / façade	17.97	0.11	2.0
Murs angle sortant	Murs angle sortant	33.17	0.15	5.0
Murs angle rentrant	Murs angle rentrant	4.61	0.03	0.1
Ponts thermiques baies / parois opaques	Ponts thermiques baies / parois opaques	70.00	0.02	1.7

Ce tableau nous informe sur les groupes de ponts créés au niveau de la construction. Ils se sont formés entre les baies et les parois opaques, sur les angles de mur ainsi qu'entre les planchers d'étages et les murs, avec des longueurs différentes et donc des déperditions différentes. Cela nous apprend sur l'isolation du bâtiment qui présente certainement des

discontinuités, ce qui peut engendrer des chutes locales de températures, des problèmes d'humidité, ainsi que des condensations pouvant provoquer des moisissures.

La figure 4.6 démontre le pourcentage de déperdition thermique à travers les différentes composantes de l'enveloppe du bâtiment.

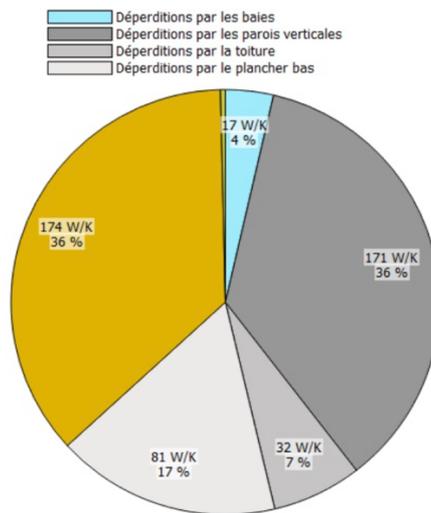


Figure 4.6 : Déperditions thermiques de l'enveloppe du bloc administratif (Auteur, 2021).

Cette figure illustre que les plus grands taux de déperditions thermiques dans ce bâtiment s'effectuent par les murs et les ponts thermiques (en jaune) avec un pourcentage de 36% pour chacun. On dira donc que l'isolation des parois n'est pas assez performante et provoque des ponts thermiques par sa discontinuité.

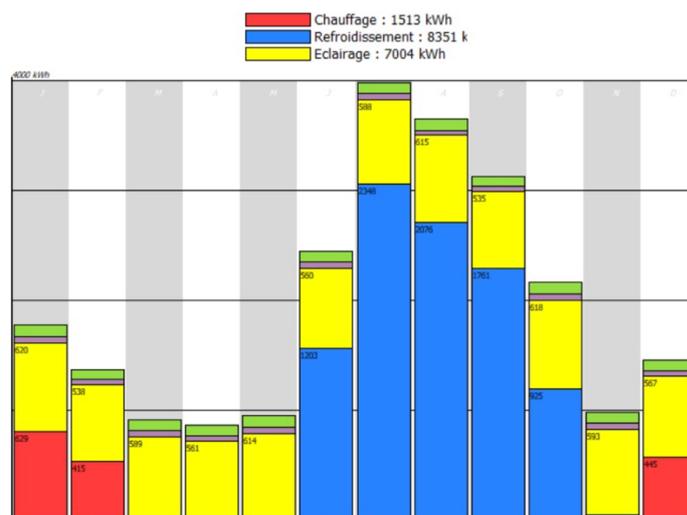


Figure 4.7 : Besoins énergétiques du bloc administratif (Auteur, 2021).

On remarque que les besoins énergétiques les plus intenses sont ceux du refroidissement (8351). Les besoins de chauffage sont aussi d'une grandeur considérable (1513 KWh). Cela indique que cette construction n'est pas efficace énergétiquement.

Nous synthétisons de cette simulation que cette construction ne présente pas d'efficacité énergétique pour ses grands besoin énergétiques dus à la déperdition thermique causé par la mauvaise isolation dont dispose l'enveloppe du bâtiment, ainsi que les ponts thermiques nombreux présents dans le bâtiment.

IV.4. Optimisation du modèle :

Vue que les principales sources de déperditions thermiques sont issues de l'enveloppe du bâtiment, nous allons proposer deux interventions différentes ; une isolation thermique intérieur (ITI) et une isolation thermique extérieur (ITE) en fibre de bois. Voici ci-dessous l'étape de configuration de la paroi extérieure du bloc administratif avec ajout d'ITI.

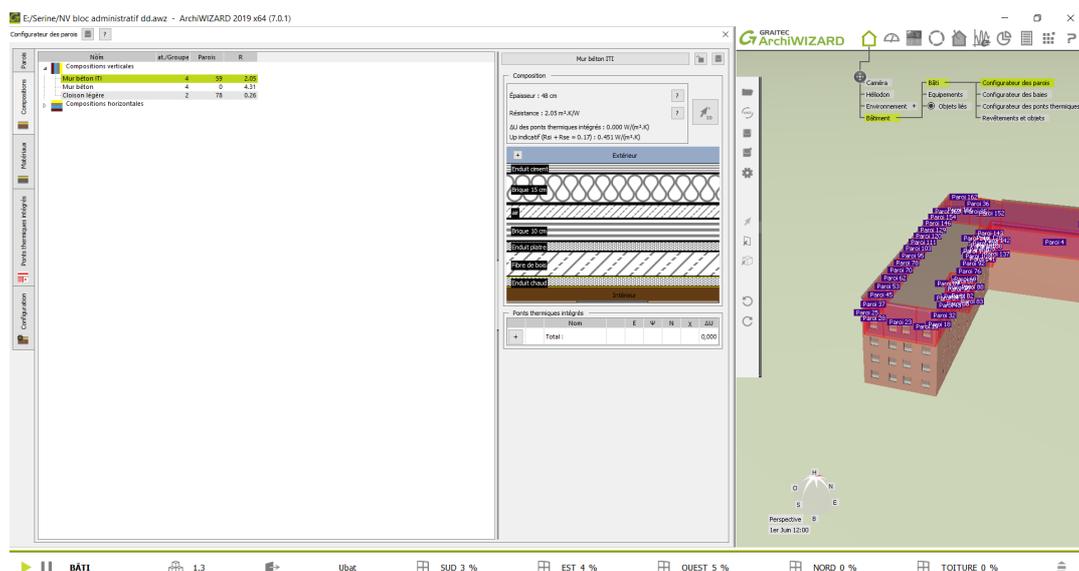


Figure 4.8 : Optimisation avec ajout d'ITI (Auteur, 2021)

Nous avons ajouté une couche de 12 cm de fibre de bois sur la face intérieur qui est faite d'enduit de plâtre, ainsi qu'un enduit de chaud de 2 cm comme finition. Ci-dessous l'étape de configuration de la paroi extérieure du bloc administratif avec ajout d'ITE.

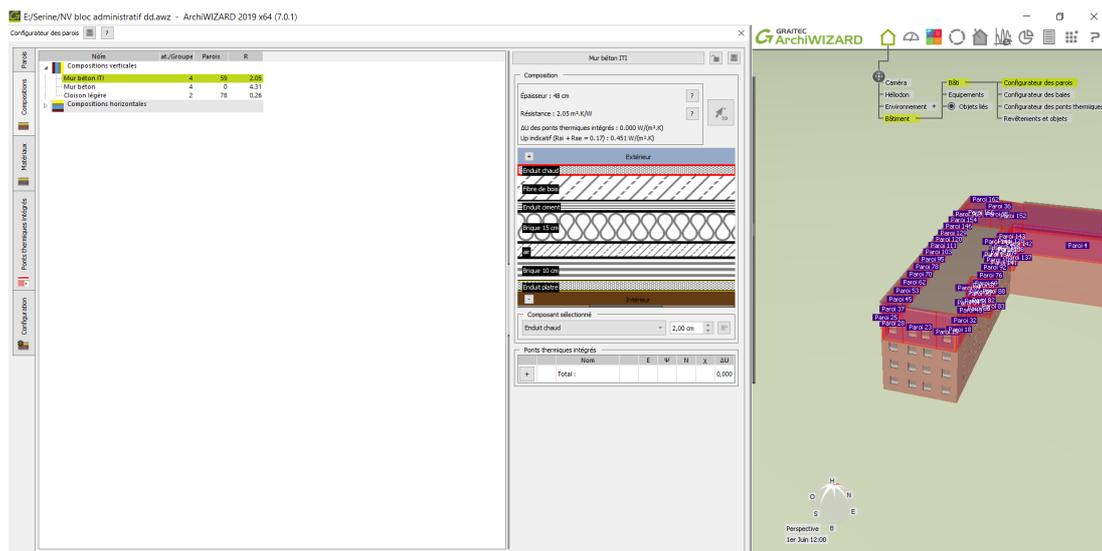


Figure 4.9 : Optimisation avec ajout d’ITE (Auteur, 2021)

Nous avons ajouté une couche de 12 cm de fibre de bois sur la couche extérieure qui est l’enduit de ciment, ainsi qu’un enduit de chaud de 2 cm comme finition. Ci-dessous un tableau qui illustre les caractéristiques thermiques de tous les matériaux composants de la paroi.

Tableau 4.2 : Caractéristiques des matériaux composants de la paroi extérieur après l’optimisation (Auteur, 2021)

	Conductivité W/(m.K)	Masse volumique kg/m ³	Chaleur spécifique J/(kg.K)	Épaisseur cm	Poids/m ² kg/m ²	R m ² .K/W
Enduit chaud	0.078	250	1500	2.0	5.0	0.26
Fibre de bois	5.000	50	2100	12.0	6.0	0.02
Enduit plâtre	0.570	1150	936	2.0	23.0	0.04
Brique 10 cm	0.390	650	936	10.0	65.0	0.26
air	0.047	1	1000	5.0	0.1	1.06
Brique 15 cm	0.390	650	936	15.0	97.5	0.38
Enduit ciment	0.800	1900	1080	2.0	38.0	0.02
Total	-	-	-	48.0	234.6	2.05

Le tableau illustre les caractéristiques des matériaux incluant ceux des isolants ajoutés. La fibre de bois est d’une très forte conductivité ainsi qu’une faible masse volumique.

IV.4.1. Résultats et interprétation de la simulation du modèle avec optimisations :

Nous allons vérifier la contribution de cette optimisation sur la performance énergétique du modèle. Les résultats de simulation avec l’ajout de ITI et ITE sont présent ici-bas. La figure qui suit présente les déperditions thermiques de l’enveloppe avec l’ajout de l’ITI.

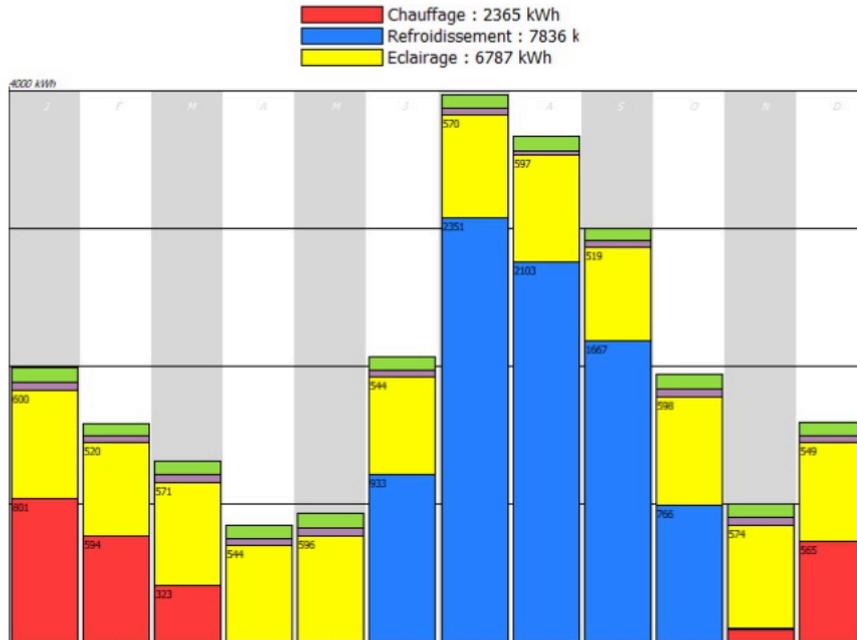


Figure 4.10 : Les besoins énergétique du bâtiment après l’optimisation avec ajout d’ITI (Auteur, 2021)

La figure illustre que les besoins énergétiques en refroidissement ont diminué par rapport à l’état initial de la paroi de 515 KWh. Cependant, les besoins en chauffage ont largement augmenté (852KWh de plus). Cette solution présente une amélioration minime pour le refroidissement du bâtiment mais n’est pas efficace pour son chauffage. La figure qui suit présentera les déperditions thermiques de l’enveloppe avec l’ajout de l’ITE.

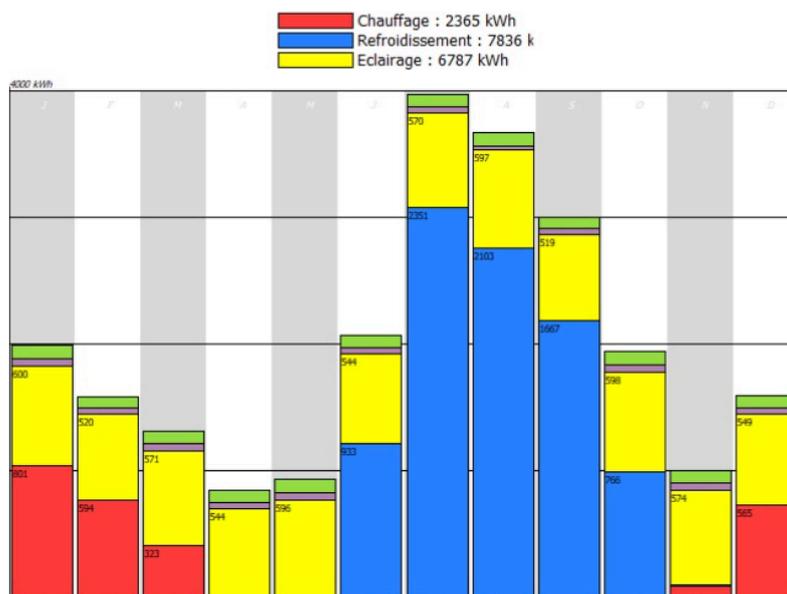


Figure 4.11 : Les besoins énergétique du bâtiment après l’optimisation avec ajout d’ITE (Auteur, 2021)

La figure illustre que les besoins énergétiques du bâtiment après l'ajout d'une isolation thermique extérieur sont exactement les même que les besoins qu'implique l'isolation thermique de l'intérieur. On dira alors que celle-ci n'est pas non plus la solution la plus adéquate.

Les solutions proposées d'isolation thermique de l'intérieur et d'isolation thermique de l'extérieur s'avèrent pas efficaces dans le cas d'étude du bloc administratif car l'isolant de fibre de bois avec enduit de chaud n'est peut-être pas l'isolant adéquat pour la composition de paroi en brique creuse avec lame d'air.

Selon l'état de l'art étudié dans les chapitres I et II, nous avons conclu que l'isolation thermique de l'extérieur présentais beaucoup plus d'avantage que l'isolation thermique de l'intérieur, car cette dernière n'était pas capable de supprimer tous les ponts thermiques présents dans le bâtiment parmi eux les ponts situé entre les planchers et les murs extérieurs. Cela correspond de manière très faible au résultats constatés lors de l'optimisation effectué.

Conclusion

Dans ce chapitre nous avons effectué une simulation numérique sur le bloc administratif, ainsi qu'une optimisation pour diminuer les besoins énergétiques du bâtiment pour améliorer sa performance. Deux solutions ont été proposé et interpréter, à savoir une isolation thermique de l'intérieur et une isolation thermique de l'extérieur avec un isolant de fibre de bois et un enduit de chaud dans les deux cas.

Conclusion générale

En vue des changements climatiques intolérables qu'a connus le globe en cette dernière décennie, et de leurs conséquences dramatiques procurées causées principalement par la consommation excessive des énergies fossiles, une problématique des mesures efficaces à prendre pour faire face à cela s'impose. Alors que le secteur du bâtiment seul représente une grande partie du totale de demande d'énergie, agir dans ce secteur pourrait représenter une réelle amélioration de la qualité environnementale. Ce challenge nous mène vers l'utilisation des énergies renouvelables et la diminution de la consommation énergétique. Il s'agit donc de contourner les constructions en de constructions durables et efficaces énergétiquement. Il est évident que l'action sur les bâtiments existants aura un plus grand et plus rapide impact sur l'environnement. C'est pour cela que notre thème de recherche s'est orienté vers la rénovation thermique des bâtiments pour une efficacité énergétique.

Notre étude se dirige vers l'étude des parois extérieures des bâtiments et leurs comportements face aux déperditions de chaleurs en hiver et les apports solaires excessifs en été. Pour cela nous avons mené une étude empirique quantitative sur deux cas d'études (immeubles de bureaux) avec de différentes compositions de parois qui consiste en la prise de mesure de température au sein de plusieurs bureaux au moment du travail. Le premier cas d'étude est le bloc administratif de Bejaïa avec une paroi en brique creuse de 30cm et une lame d'air de 5 cm comme isolant thermique. Nous avons choisi des bureaux situés dans un étage courant et orienté différemment. Le deuxième cas d'étude qui est la direction des travaux publics de Bejaïa est composé de deux parties, l'une ancienne avec des parois extérieures de 70 cm en pierre dure, et l'autre avec des parois extérieures de 30 cm en brique creuse et une lame d'air de 5 cm. Nous avons choisi deux bureaux situés dans un même étage courant, chacun situé dans une des parties du bâtiment. Le bureau se trouvant dans la partie ancienne possède deux parois exposées vers l'extérieurs. Un questionnaire a également été distribué sur les employés du deuxième cas d'étude pour avoir mieux apprendre sur leur confort thermique au sein des bureaux durant leurs heures de travaux. À travers l'interprétation des résultats obtenue ces études, nous avons constaté que les deux parois impliquent des besoins de refroidissement en été et de réchauffement en hiver, ce qui a une incidence notable sur la consommation énergétique, la paroi en pierre dure étant plus

performante que la paroi en brique creuse. La plupart des employées ne se sont pas satisfaits du confort apporté au bureaux, et c'est la meilleure manière de prouver l'inefficacité de l'enveloppe du bâtiment. Nous avons également effectué une simulation numérique sur le bloc administratif, ainsi qu'une optimisation pour diminuer les besoins énergétiques du bâtiment pour améliorer sa performance. Deux solutions ont été proposées et interprétées, à savoir une isolation thermique de l'intérieur et une isolation thermique de l'extérieur avec un isolant de fibre de bois et un enduit de chaux dans les deux cas. Ces solutions se sont avérées pas efficaces dans le cas d'étude du bloc administratif car l'isolant de fibre de bois avec enduit de chaux n'est peut-être pas l'isolant adéquat pour la composition de paroi en brique creuse avec lame d'air.

Cette étude a enfin permis de proposer des pistes d'économie d'énergies afin de procurer un état de confort thermique au sein des bâtiments, et d'offrir des qualités durables aux constructions pour préserver l'environnement.

Recommandation

- Construction compacte pour limiter les échanges avec l'extérieur
- L'utilisation des énergies renouvelables ; les panneaux solaires photovoltaïques, récupération des eaux pluviales, système de climatisation solaire.
- L'intégration des puits canadien, de toitures végétalisées et de serres bioclimatiques
- Une isolation par l'extérieur avec un enduit pour supprimer les ponts thermiques
- L'intégration de brise soleils fixes ou mobiles, horizontaux en façade sud, et verticaux en façade ouest pour éviter les surchauffes.
- L'intégration de la végétation à l'extérieur au creux du bâtiment.

Limites de recherche

Parmi les limites de cette recherche on cite :

- Le manque de moyens, car le thermomètre hygromètre n'était pas accessible ce qui m'a pris une marge de temps énorme avant d'acheter et d'entamer les prises de mesures,
- Les prises des températures qui n'étaient pas effectuées dans les conditions naturelles (les climatiseurs ont été allumés dans quelques bureaux).
- Quelques employés n'ont pas répondu au questionnaire.

Perspectives de recherche

À l'issue du travail que nous avons effectué, nous avons dégagé des perspectives intéressantes qui restent à explorer dans les travaux de recherche futurs. Parmi elles, nous citons

* Étude de rénovation acoustique d'un bâtiment pour atteindre une efficacité énergétique.

* Étude comparative entre un bâtiment performant nouveau et un bâtiment performant rénové afin de voir l'évolution de l'efficacité de la rénovation énergétique.

Bibliographie

- Ansar, A. M., & Djebaili, I. A. (2017).** *L'efficacité énergétique dans le bâtiment architectural. Cas d'étude : Évaluation des performances énergétiques du rectorat de l'université d'Oum El Bouaghi.* Mémoire de master, UNIVERSITE LARBI BEN M'HIDI, DEPARTEMENT D'ARCHITECTURE, Oum el bouaghi.
- Auliciems, A; Steven V, S. (2007).** Thermal Comfort. Passive and Low Energy Architecture International Design Tools and Techniques. URL:
<https://opencourses.emu.edu.tr/pluginfile.php/4408/course/section/786/MENG443%20PPT1B.pdf>
- APRUE. (2007).** *Consommation Énergétique Finale de l'Algérie.* Ministère de l'Énergie et des Mines, Agence Nationale pour la Promotion et la Rationalisation de l'Utilisation de l'Énergie.
- APRUE. (2019).** *PROGRAMME ECO-BAT.* Publication, Ministère de l'Énergie.
(2013). *Bâtiments d'habitation : Systèmes d'aération standard.* Agence Minergie romande. MINERGIE .
- Benjeddou, O., & Jedidi, M. (2016).** *La thermique du bâtiment : du confort thermique au choix des équipements de chauffage et de climatisation.* Dunod.
- Bouarroudj, N. (2016)** Rénovation énergétique dans le secteur résidentiel à Constantine un gisement potentiel pour la consécration des nouvelles exigences énergétiques et environnementales. *Revue des Énergies Renouvelables* Vol. 19 N°3 387 – 396. URL :
file:///Users/MacBook/Downloads/NAIT_ICEMAEP2019.pdf
- Bulle, C., Margni, M., Patouillard, L., Boulay, A.-M., Bourgault, G., De Bruille, V., ... Jolliet, O. (2019).** *IMPACT World+: a globally regionalized life cycle impact assessment method. The International Journal of Life Cycle Assessment.* DOI:
<https://doi.org/10.1007/s11367-019-01583-0>
- Candas, V. (1998).** Confort thermique. Génie énergétique. Vol. BE 4. *Techniques de l'ingénieur*, p. BE 9085.
- Catellani, A. (2021, juin 02).** *Publicationnaire. Dictionnaire encyclopédique et critique des publics.* Consulté le juin 08, 2021, sur publicationnaire.huma-num.fr :
<http://publicationnaire.huma-num.fr/>
- DJERROUD, L., & MAKHLOUFI, A. (2019).** *Évaluation de la vulnérabilité à la pollution de la nappe superficielle de Boulimat (béjaia) par la méthode GALDIT.* Mémoire de fin d'étude, Université Abderrahmane Mira-Bejaia, Département des Sciences Biologiques de l'Environnement, Béjaia .
- Dominique, G.-M. (2001).** *L'ARCHITECTURE ÉCOLOGIQUE 29 EXEMPLES EUROPÉENS.* Paris, France: LE MONITEUR.
- EPIQR. (2018).** *Rapport d'analyse EPIQR+.* Rapport d'analyse, EPIQR Rénovation Sàrl / EPFL Innovation Park-Bâtiment C, Lausanne.

EPIQR+ Diagnostic et calcul des coûts de rénovation. (2014). Consulté le juin 26, 2021, sur www.epiqrplus.ch: <https://www.epiqrplus.ch/epiqr-energie>

EUROPEAN COMMISSION - JOINT RESEARCH CENTRE - INSTITUTE FOR ENVIRONMENT AND SUSTAINABILITY. (2011). International Reference Life Cycle Data System (ILCD) Handbook - Recommendations for Life Cycle Impact Assessment in the European context. First edition November 2011 [en ligne]. EUR 24571 EN. Publications Office of the European Union. URL: <http://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/handle/JRC61049>

FARAH, A. K. (2014). *Changement climatique ou variabilité climatique dans l'Est algérien.* mémoire de magistère, UNIVERSITE CONSTANTINE 1 FACULTE DES SCIENCES DE LA NATURE ET DE LA VIE, DEPARTEMENT DE BIOLOGIE ET ECOLOGIE, constantine.

François, R. (2017). *Principe de fonctionnement et réversibilité de la pompe à chaleur.* Bruxelles. Frossard, M. (2020). *Optimisation robuste multicritère pour l'écoconception de bâtiments zéro-énergie.* [Thèse de doctorat, Université Paris sciences et lettres]. archives-ouvertes.fr. URL : <https://pastel.archives-ouvertes.fr/tel-03122524>

Georg, G., Rainer, F., KRAUSE, H., MUSSO, F., Karl-Heinz, P., & Alexander, R. (2012). *Rénover le bâti, MAINTENANCE, RECONVERSION, EXTENSION* (éd. DETAIL).

(s.d.). *Guide des matériaux isolants.*

Grundströme, K., Johansson, E., Mraissi, M., Ouahrani, D. (2003). *Climat et Urbanisme - La Relation entre le Confort Thermique et la Forme du Cadre Bâti.* Centre des Nations Unies pour les Établissements Humains. URL : <https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:1405001/FULLTEXT01.pdf>

Hamdani, M. (2016). *Choix de l'orientation et des matériaux de construction en vue d'améliorer les performances thermiques du bâtiment.* Université ABOU BAKR BELKAID, Tlemcen. <file:///C:/Users/user/Downloads/Choix-de-lorientation-et-des-materiaux-de-construction-en-vue-dameliorer-les-performances-thermiques-des-batiments.pdf> (Consulté le 25/01/2021).

Hovsepyan, A. (2020). *Rénovation énergétique de bâtiments tertiaires.* Master en ingénieur civil architecte, Université de Liège, Faculté des Sciences Appliquées , Liège .

IEA, IRENA, UNSD, Bank, W., & WHO. (2021). *TRACKING SDG7 THE ENERGY PROGRESS REPORT 2021.*

IRENA. (2021). *RENEWABLE ENERGY POLICIES FOR CITIES EXPERIENCES IN CHINA, UGANDA AND COSTA RICA.*

IRENA international renewable energy agency . (2021). Consulté le juin 2021, sur <https://www.irena.org/>: <https://www.irena.org/publications/2021/Jun/Tracking-SDG-7-2021>

(1998). *ISOLATION THERMIQUE DES MURS CREUX.* Direction générales des technologies de la recherche et de l'énergie.

Jean Louis, B., & Franck, J. (2017). *L'isolation thermique-acoustique Solutions combinées écologiques En neuf et en rénovation.* Mens, France: terre vivante.

JEAN-PIERRE, Moya. Isolation thermique durable des bâtiments existant. Le moniteur. France : Antony, 2018, 296p, (Choix multicritères, Manuel pratique). (978-2-281-14294-5) (consulté le 05/01/2021).

JIANEN Huang, HENGLIN Lv, TAO Gao, WEI Feng, YANXIA Chen, TAI Zhou. Thermal properties optimization of envelope in energy-saving renovation of existing public buildings. Chine, 2014.

<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0378778814001546> (Consulté le 16/01/2021).

JUMIA. (2021). Consulté le 2021, sur jumia.dz: <https://www.jumia.dz/temperature-thermometre-hygrometre-numerique-lcd-interieur-exterieur-ta138-ta-mpg17914.html>

Lavigne, P., Brejon, P., & Fernandez, P. (1994). *Architecture climatique : une contribution au développement durable* (Vol. Vol. 1). La Calade, Aix-en-Provence: Édisud.

Markus, M., Lucie, M., PFLUG, D., & Bettina, H. (2014). *bois et réhabilitation de l'enveloppe rénover, isoler, optimiser.* (P. p. romandes, Éd.)

MOUJALLED, B. (2007). *Modélisation dynamique du confort thermique dans les bâtiments naturellement ventilés.* [Thèse de doctorat, L'Institut des Sciences Appliquées de Lyon Département Génie Civil et Bâtiment]. URL: <http://theses.insa-lyon.fr/publication/2007ISAL0005/these.pdf>

NOAA, national oceanic and atmospheric administration, National Centers for Environmental Information. (2021). (M. S. Wohlgemuth, Producteur) Consulté le juin 08, 2021, sur [ncdc.noaa.gov](https://www.ncdc.noaa.gov/): <https://www.ncdc.noaa.gov/>

Olivier, SIDLER. La rénovation thermique des bâtiments en France Enjeux et stratégie. ENERTECH. Aout 2012. https://www.enertech.fr/pdf/48/enjeux-de-la-renovation-thermique-des-batiments-en-france_v0.pdf (consulté le 04/01/2021).

organisation météorologique mondiale (OMM). (2019). Récupéré sur public.wmo.int:
<https://public.wmo.int/fr/medias/communiqu%C3%A9s-de-presse/changement-climatique-en-2020-des-indicateurs-et-des-effets-de-plus-en>
(2017). Puits canadien Puits provençal. INFO ENERGIE .

PARSONS, K. (2003). *Human thermal environment*. (2nd Edition, 527p). Taylor & Francis.
URL:
<https://books.google.dz/books?id=WejMAwAAQBAJ&pg=PA573&dq=PARSONS+KEN.+Human+thermal+environment.+2003+third+edition&hl=fr&sa=X&ved=2ahUKEwjvCjttHvAhWtz4UKHcpqAt8Q6AEwAHoECAYQA#v=onepage&q=PARSONS%20KEN.%20Human%20thermal%20environment.%20202003%20third%20edition&f=false>

PIERRE, Lefèvre. Ressources de l'architecture pour une ville durable. Apogée. Rennes : janvier 2012, 127p. (978-2-84398-404-4). (Consulté le 05/01/2021).

Rakoto, H, A. (2012). *Évaluation Du Confort Thermique Généré Par Des Solutions Passives : Cas D'un Bâtiment Universitaire*. [Thèse de doctorat, Université D'antananarivo]. URL:
http://biblio.univ-antananarivo.mg/pdfs/rakotoHarryA_PH_M2_12.pdf

RICHARD, J. (1998). Developing an Adaptive Model of Thermal Comfort and Preference. *ASHRAE, vol 104 part I, 18p*. URL: <https://escholarship.org/uc/item/4qq2p9c6>

Roussel, I. (2015). Le confort thermique au cœur de la rénovation des logements : norme ou stratégie d'adaptation ?. *Pollution atmosphérique*, N° 225. DOI :
<https://doi.org/10.4267/pollution-atmospherique.4775>

Rüdinger, A. (2013). *La rénovation thermique des bâtiments en France et en Allemagne : quels enseignements pour le débat sur la transition énergétique ?*. Publication, Iddri, Paris.

(2020). RENEWABLES 2020 GLOBAL STATUS REPORT. Arthouros Zervos.

Roberto, K. J. (2008). *ARCHITECTURE ET EFFICACITÉ ÉNERGÉTIQUE PRINCIPE DE CONCEPTION ET DE CONSTRUCTION*. BIRKHAUSER.

Sédillot, B. (2021). *Chiffres clés du climat France, Europe et Monde*. ministère de la transition écologique. Le service des données et études statistiques (SDES).

SEDIRA, S. (2020). *Caractérisation du confort thermique en espaces extérieurs. Le cas d'un ksar du bas-Sahara*. [Thèse de doctorat, Université Mohamed Khider-Biskra]. URL:
<http://thesis.univ-biskra.dz/5310/1/m%C3%A9moire%20final%20apr%C3%A9s%20le%20soutenance.pdf>

State of the Global Climate 2020. (2021, avril 20). Consulté le juin 09, 2021, sur storymaps.arcgis.com:
<https://storymaps.arcgis.com/stories/6942683c7ed54e51b433bbc0c50fbdea>

Stocker, T.F., Qin, D., Plattner, G.-K., Tignor, M., Allen, S.K., Boschung, J., Nauels, A., Xia, Y., Bex, V. et Midgley, P.M. (2013). Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Cambridge University Press. DOI: <http://dx.doi.org/10.1017/CBO9781107415324>

TAGREROUT, M., & ATMANIA, H. (2021, avril 07). La transition énergétique en Algérie : comment préparer l'après pétrole à l'horizon 2030 ? *Journal of Economic Sciences Institute* , 24 , 1367-1382.

The Energy Progress Report. (2021). Consulté le juin 09, 2021, sur trackingsdg7.esmap.org:
<https://trackingsdg7.esmap.org/country/algeria>

Treen, K. M., Williams, H. T., & O'Neill, S. J. (2020). Online misinformation about climate change. *WIREs Climate Change*.

UNESCO-UNEVOC. (2020). *Skills development for renewable energy and energy efficient jobs. Discussion paper on solar energy.* Publication, Bonn.

WCE, I., & l'ADEM. (2013). *Perspectives énergétiques mondiales Les politiques d'efficacité énergétique dans le Monde : Ce qui fonctionne et ce qui ne fonctionne pas .*

XING, Shi. Design optimization of insulation usage and space conditioning load using energy simulation and genetic algorithm. Chine : 2011.
<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S036054421000770X> (Consulté le16/01/2021).

Zraggen, J. (2010). Bâtiments résidentiels locatifs à haute performance énergétique : objectifs et réalités. Genève. file:///C:/Users/user/Downloads/unige_13093_attachment01.pdf (Consulté le 25/01/2021).

ANNEXE

Annexe A

Questionnaire

Dans le cadre d'une recherche de fin d'étude, je vous prie de bien vouloir répondre à ce questionnaire à fin que je puisse étudier le confort thermique au sein de votre lieu de travail.

1/ Comment juger vous la température de votre bureau en été ?

Très mauvaise	Insatisfaisante	Moyen	Satisfaisante	Excellente

2/ Pour quelle solution optez-vous pour résoudre le problème de chaleur

Ouverture des portes Ouvertures des fenêtres Allumage du climatiseur

Autres.....

3/ À quel moment de la journée optez-vous pour cette solution

8H- 10H	10H-12H	12H-14H	14H-16H

.....

4/ À quel point cette (ces) solution(s) contribue t'elle(s) à résoudre le problème de chaleur ?

Totalement Partiellement Pas du tout

5/ Comment juger vous la température de votre bureau en hiver ?

Très mauvaise	Insatisfaisante	Moyen	Satisfaisante	Excellente

6/ Pour quelle solution optez-vous pour résoudre le problème de froid ?

Fermeture des portes Fermeture des fenêtres Allumage du chauffage

7/ À quel moment de la journée optez-vous pour cette solution

8H- 10H	10H-12H	12H-14H	14H-16H

.....

8/ À quel point cette (ces) solution(s) contribue t'elle(s) à résoudre le problème de chaleur ?

Totalement Partiellement Pas du tout

9/ Constatez-vous que l'air dans votre bureau est

Humide Pas humide

10/ Autres commentaires sur la température de votre bureau

.....
.....
.....

Je vous remercie de votre précieuse collaboration.

Annexe B

Tableau de synthèse des matériaux d'isolation		Paramètres physiques statiques (voir définitions page 4)			Comportement à l'humidité (voir page 4)	Comportement au feu EN 13501-1 (voir tableau page 6)		Valeurs de calculs thermiques réglementaires et simulations thermiques dynamiques											
		Densité ou masse volumique (kg/m³)	Chaleur spécifique c (J/Kg.K)	Conductivité thermique λ (W/m.K)		NF	EUROCLASSE	RT 2005				BBC							
								Toiture R = 5 m².K/W		Mur R = 2,8 m².K/W		Sol R = 2,8 m².K/W		Toiture R = 7,5 m².K/W		Mur R = 4,5 m².K/W		Sol R = 4 m².K/W	
								Épaisseur en cm	Déphasage en heures	Épaisseur en cm	Déphasage en heures	Épaisseur en cm	Déphasage en heures	Épaisseur en cm	Déphasage en heures	Épaisseur en cm	Déphasage en heures	Épaisseur en cm	Déphasage en heures
Les laines minérales	La laine de verre	27	1030	0,035	6	M0, M1	A1, F	17,50	3,9	9,90	2,0			26,25	5,4	15,75	3,2		
	La laine de roche	35	1030	0,038	12	M0, M1	A1, F	16,00	4,3	10,64	2,4			28,50	6,4	17,10	3,8		
	Laine minérale haute densité	150	1030	0,04		M0, M1	A1, F					11,20	5,1					16,00	7,2
Matériaux isolants d'origine synthétique	Polystyrène extrudé	30	1400	0,03	120		E	15,00	4,1	8,40	2,3	8,40	2,3	22,50	6,1	13,50	3,7	12,00	3,3
	Polystyrène expansé	20	1450	0,032	70		E	16,00	3,5	8,96	2,0	8,96	2,0	24,00	5,3	14,40	3,2	12,80	2,8
	Polyuréthanes	34	1450	0,029	150	M2	C-S1,d0	14,50	4,3	8,12	2,4	8,12	2,4	21,75	6,5	13,05	3,9	11,60	3,5
	Aérogels	70	1460	0,012	160		F	6,00	3,9	3,36	2,2	3,36	2,2	9,00	5,9	5,40	3,5	15,36	10,1
Monomères	Brique terre cuite	740	1060	0,12	13	M0	A			33,60	19,2					54,00	30,8		
	Béton cellulaire	400	900	0,07	3	M0	A			19,60	10,2					31,50	16,4		
	Pierre poreuse	700	1000	0,133	15	M0	A			37,24	19,6					59,85	31,6		
Matériaux isolants issus de l'agriculture	le lin	30	1560	0,037	<2	M4	E	18,50	4,7	10,38	2,6			27,75	7,0	18,85	4,2		
	Botte de paille	100	1400	0,045	2	M1	B	22,50	9,1	12,60	5,1	12,60	5,1	33,75	13,7	20,25	8,2	18,00	7,3
	Chênevotte bituminée	150	1950	0,06	900	M1	B					19,80	8,5					24,00	12,2
	la chènevotte	105	1944	0,052	<2	M4	E	26,00	11,8	14,56	5,6	14,56	5,6	39,00	17,8	23,40	10,7	20,80	9,5
	le chanvre	40	1800	0,041	<2	M4	E	26,50	9,2	11,48	3,5			30,75	9,4	19,45	5,6		
	Briques de chanvre	300	1700	0,07	6	M1	F			19,60	12,2					31,50	19,5		
	Béton de chanvre	420	1700	0,1	8		F	50,00	30,7	28,00	17,2	28,00	17,2	75,00	46,1	45,00	27,6	40,00	24,6
Matériaux isolants à base de bois	Les fibragglos	350	2000	0,09	10	M1	B	45,00	28,9			25,20	16,2	67,50	43,3			36,00	23,1
	Liège expansé noir	125	1560	0,04	10	M1	B	20,00	10,2	11,20	5,7	11,20	5,7	30,00	15,2	18,00	9,1	16,00	8,1
	Fibres de bois sculptés	50	2100	0,038	5	M4	E	19,00	7,3	10,64	4,1			28,50	10,9	17,10	6,5		
	Fibres de bois denses	190	2100	0,049	5	M4	E	24,50	16,1	13,72	9,0	13,72	9,0	36,75	24,1	22,05	14,5	19,60	12,9
Matériaux isolants issus du recyclage	Le textile recyclé	25	1460	0,039	2,2	M4	E-S1,d0	19,50	4,2	10,92	2,4			29,25	6,4	17,55	3,8		
	la ouate de cellulose	50	2000	0,038	2	M1	B-S2,d0	16,00	7,1	10,64	4,0	10,64	4,0	28,50	10,6	17,10	6,4	15,20	5,7
Matériaux isolants d'origine animale	La laine de mouton	16	1720	0,035	1	M4	D-S1,d0	17,50	3,8	9,90	2,0			26,25	5,4	15,75	3,2		
	La plume de canard	20	1600	0,035	1,46	M4	E	17,50	3,8	9,90	2,2			26,25	5,8	15,75	3,5		
Matériaux isolants minéraux	La perlite expansée	70	900	0,06	2	M0	A	30,00	7,1	16,80	4,0	16,80	4,0	45,00	10,6	27,00	6,4	24,00	5,7
	La vermiculite expansée	90	900	0,062	<4	M0	A	31,00	8,1	17,36	4,6	17,36	4,6	48,50	12,2	27,90	7,3	24,80	6,5
	La pouzzolane	850	850	0,15	<4	M0	F	75,00	37,8	42,00	21,2	42,00	21,2	112,50	56,8	67,50	34,1	60,00	30,3

Annexe C

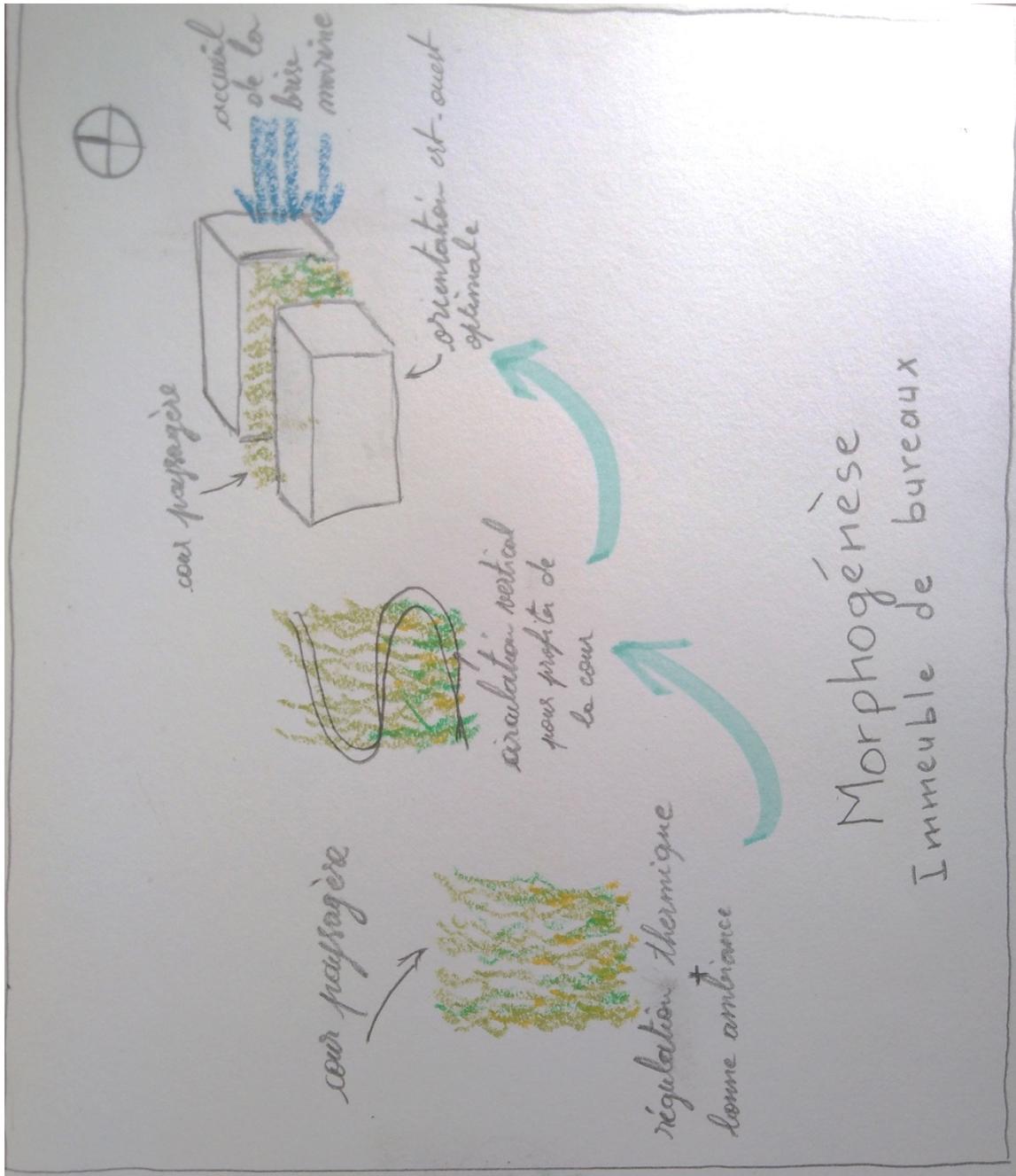


Figure Annexe : Morphogénèse du projet de fin d'étude.