



Faculty of Sciences and Technology

Civil Engineering Department

كلية العلوم والتكنولوجيا

قسم الهندسة المدنية

N° d'ordre : M2.../GC/2024

## MEMOIRE DE FIN D'ETUDES DE MASTER ACADEMIQUE

Filière : Génie civil

Option : Structures

Thème

**Simulation numérique de la réhabilitation  
énergétique d'un bâtiment tertiaire**

Présenté par :

Mlle OUAHAB Maroua

Soutenu le 25/06/2024 devant le jury composé de :

Pr LAREDJ Nadia

Président

Université de Mostaganem

Pr MALIKI Mustapha

Encadrant

Université de Mostaganem

Pr MISSOUM Hanifi

Examineur

Université de Mostaganem

Année Universitaire 2023/2024

## Remerciements

Je remercie en premier lieu Monsieur MALIKI Mustapha pour son encadrement, ses conseils avisés et son soutien tout au long de ce travail de recherche, ses remarques pertinentes et sa disponibilité ont été d'une grande aide pour mener à bien ce travail.

Je souhaite également remercier les autres membres au jury, les Professeurs Mr MISSOUM Hanifi et Mme LAREDJ Nadia pour le temps qu'ils accorderont à la lecture de mon travail de fin d'études.

Mes remerciements s'adressent aussi au laboratoire de construction de transport et protection de l'environnement (LCTPE) pour le matériel et le personnel mis à disposition afin de réaliser ce projet.

Je tiens à remercier la section des 2ème année Master en Génie Civil et ceux de l'option «STRUCTURES» pour les quelques années passées ensemble, la bonne ambiance et l'entraide, je n'oublie pas mes parents et ma famille, dont l'Amour, la patience et les encouragements m'ont donnée la force de persévérer.

Enfin, un tout grand merci à mes parents, mes amis, ma famille, et toutes les personnes que j'ai omis de citer ici pour leur soutien lors de ce travail.

## Dédicaces

Je dédie ce mémoire à mes parents, dont le soutien indéfectible et les encouragements constants ont été une source inestimable de motivation tout au long de mes études. Leur amour et leur confiance en mes capacités m'ont donnée la force de persévérer même dans les moments les plus difficiles.

A toute ma famille et mes amies, pour les camaraderies et leur aide précieuse, ainsi que pour les moments de joie et de détente qui ont rendu cette période plus agréable et à madame l'architecte Bathoul.F pour son aide précieuse et ses conseils avisés, sa disponibilité et le suivi de ce travail avec beaucoup d'intérêts.

Enfin, à mes professeurs et particulièrement à monsieur MALIKI Mustapha, dont les enseignements et les conseils avisés ont été essentiels à la réalisation de ce travail. Leur dévouement à l'éducation et à la recherche m'a inspirée à donner le meilleur de moi-même.

Merci à tous pour votre soutien et votre encouragement.

# Table des matières

Dédicaces .....	ii
Résumé : .....	v
Introduction générale : .....	10
Chapitre I : La consommation d'énergie en Algérie .....	11
II.1. Introduction : .....	12
II.2. La stratégie de la maîtrise de l'énergie en Algérie : .....	12
II.3. La consommation énergétique par type d'énergie : .....	14
II.5. Les foyers de consommation d'énergie dans un logement : .....	18
II.5.1 Les équipements : .....	18
II.5.2 Energie de chauffage orientée eau chaude sanitaire (ECS) : .....	19
II.6 Les déperditions thermiques dans un bâtiment : .....	20
II.7 Programmes en cours de lancement en Algérie : .....	25
II.7.1 Isolation thermique des bâtiments : .....	25
II.7.2 Développement du chauffe-eau solaire : .....	26
II.7.4 Introduction de la performance énergétique dans l'éclairage public : .....	27
II.7.5 La promotion de l'efficacité énergétique dans le secteur industriel : .....	27
II.8 Règlements thermiques Algériens du bâtiment : .....	27
Conclusion : .....	28
Chapitre II : Modes de transfert de chaleur dans le bâtiment .....	1
I.1 : Introduction aux différents modes de transfert : .....	2
I.1.2. Grandeurs physiques fondamentales : .....	3
I.1.3. Résistance thermique d'un matériau : $R_{th}$ .....	7
I.1.4. Résistance thermique et coefficient global : .....	8
I.1.5. Résistance de contact fluide/solide : .....	8
I.2.2. Convection naturelle (libre) : .....	10
I.2.3. Convection forcée : .....	12
I.3.1. Rayonnement : .....	13
I.2 Conclusion : .....	15
Chapitre III : Techniques de réhabilitation énergétique des maisons individuelles et bâtiments collectifs .....	16
Chapitre III : Techniques de réhabilitation énergétique des maisons individuelle et des bâtiments collectif .....	17
III.1 Introduction : .....	17
III.2 Performance énergétique d'un bâtiment : .....	17
III.4 Audits énergétiques : .....	18

<b>III.5 Étiquette énergétique :</b> .....	18
<i>III.5.1 Définition :</i> .....	18
<b>III.5.2 Classe énergie :</b> .....	19
<b>III.5.3 Label Energétique HQE:</b> .....	19
<b>III.6 La rénovation énergétique</b> .....	20
<i>III.6.1 Introduction :</i> .....	20
<i>III.6.2 Les avantages de la rénovation énergétique :</i> .....	20
<b>III.6.3 Les différents travaux de rénovation énergétique</b> .....	20
<b>III.7 L'isolation thermique</b> .....	20
<i>III.7.1 Isolation des combles :</i> .....	21
<i>III.7.2 Isolation des combles habitables :</i> .....	22
<i>L'ITE peut être mise en œuvre selon 4 différents procédés :</i> .....	24
<b>III.8 Le rehaussement de la charpente par mise en œuvre d'un contre chevonnage :</b> .....	25
<b>III.9 Isolation des murs :</b> .....	27
<b>III.9 Isolation du sol :</b> .....	32
<b>III.10 Changement des menuiseries :</b> .....	33
<i>III.10.1 Isolation des parois vitrées :</i> .....	34
<i>III.10.2 La modernisation du système de chauffage et de climatisation :</i> .....	36
<b>III.11 Analyse des composants des systèmes de climatisation :</b> .....	42
<b>III.12 Refroidissement de l'air :</b> .....	45
<b>III.13 Fonctions supplémentaires :</b> .....	46
<b>III.14 Types de systèmes de climatisation :</b> .....	46
<b>III.15 Les équipements de ventilation :</b> .....	48
<b>III.16 L'optimisation des éclairages :</b> .....	50
<b>III.17 Conclusion :</b> .....	51
<b>Chapitre IV : Simulation numérique de la réhabilitation thermique d'un bâtiment tertiaire...</b>	52
<b>CHAPITRE IV : Simulation numérique de la réhabilitation thermique d'un bâtiment tertiaire</b>	53
<b>V.1 Présentation cas d'étude :</b> .....	53
<b>V.2 Caractéristiques géométriques :</b> .....	53
<b>V.3 Simulation numérique du comportement dynamique thermique du cas étudiée :</b> .....	57
<b>V.3.1 Présentation du logiciel COMSOL Multiphysiqs :</b> .....	57
<b>V.3.2 Géométrie :</b> .....	60
<b>V.3.3. Matériau employés :</b> .....	61
<b>Conclusion générale :</b> .....	69
<b>Références bibliographiques</b> .....	70

## Résumé :

En Algérie, le secteur du bâtiment représente à lui seul 40% de la consommation d'énergie finale. La nécessité de réduire cette consommation est désormais plus qu'une nécessité au vu du contexte énergétique difficile que traverse le pays.

Le travail réalisé ici concerne essentiellement la Simulation numérique de la réhabilitation énergétique d'un bâtiment tertiaire. Qui est un processus complexe qui permet d'évaluer et d'optimiser les performances énergétiques d'un bâtiment existant.

En résumé, la simulation numérique de la réhabilitation énergétique d'un bâtiment tertiaire est un outil essentiel pour concevoir des stratégies de rénovation efficaces, réduire la consommation d'Énergie, et améliorer le confort des usagers.

## Abstract

In Algeria, the building sector alone represents 40% of final energy consumption. The need to reduce this consumption is now more than a necessity given the difficult energy context the country is going through.

The work carried out here essentially concerns the digital simulation of the energy rehabilitation of a tertiary building. Which is a complex process that makes it possible to evaluate and optimize the energy performance of an existing building.

In summary, digital simulation of the energy rehabilitation of a tertiary building is an essential tool for designing effective renovation strategies, reducing energy consumption, and improving occupant comfort.

## ملخص

يمثل قطاع البناء في الجزائر وحده 40% من الاستهلاك النهائي للطاقة. أصبحت الحاجة إلى تقليل هذا الاستهلاك الآن أكثر من مجرد ضرورة نظرًا لظروف الطاقة الصعبة التي تمر بها البلاد. يتعلق العمل المنجز هنا بشكل أساسي بالمحاكاة الرقمية لإعادة تأهيل الطاقة لمبنى التعليم العالي. وهي عملية معقدة تجعل من الممكن تقييم وتحسين أداء الطاقة في المبنى الحالي. باختصار، تعد المحاكاة الرقمية لإعادة تأهيل الطاقة في مبنى التعليم العالي أداة أساسية لتصميم استراتيجيات تجديد فعالة، وتقليل استهلاك الطاقة، وتحسين راحة المستخدم.

## Liste des figures

<b>Figure 1.</b> Les trois modes de transfert de chaleur dans une construction.....	2
<b>Figure 2.</b> Transfert de chaleur par conduction.....	3
<b>Figure 3.</b> Flux de chaleur traversant la surface S d'un mur.....	4
<b>Figure 4.</b> La conductivité thermique de quelques matériaux. ....	5
<b>Figure 5.</b> Variation de la conductivité en fonction de la température pour la laine de verre.....	5
<b>Figure 6.</b> Variation de la conductivité des en fonction de l'humidité pour certains matériaux minéraux ( brique , béton). ....	6
<b>Figure 7.</b> Symboles de la résistance thermiques.....	8
<b>Figure 8.</b> Les lois de la résistance thermique. ....	8
<b>Figure 9.</b> Résistance thermique d'interface entre un environnement fluide et un solide. ....	9
<b>Figure 10.</b> Principe de la convection thermique dans une pièce. ....	10
<b>Figure 11.</b> La convection naturelle. ....	11
<b>Figure 12.</b> Différentes sources de rayonnement thermique.....	13
<b>Figure 14.</b> Emission évitées (en millions de tonnes CO2) (APRUE).....	13
<b>Figure 15.</b> Dépense énergétique dans un foyer type (APRUE).....	13
<b>Figure 16.</b> Consommation énergétique finale en Algérie par type (APRUE).....	15
<b>Figure 17.</b> Consommation énergétique finale en Algérie par type 2018.....	15
<b>Figure 19.</b> Consommation d'énergie dans les logements (selon les normes françaises) .....	19
<b>Figure 20.</b> Les déperditions thermiques dans une maison individuelle.....	20
<b>Figure 21.</b> Pertes d'énergie dans un bâtiment non isolé (Ademe).....	21
<b>Figure 22.</b> Toiture d'une maison non isolée. ....	21
<b>Figure 23.</b> Murs extérieurs en brique non isolé.....	22
<b>Figure 24.</b> Système de renouvellement d'air dans un bâtiment.....	23
<b>Figure 25.</b> Thermographie de la façade d'un bâtiment .....	24
<b>Figure 26.</b> Plancher bas d'une maison sans isolation.....	24
<b>Figure 30.</b> Membrane d'étanchéité pour l'isolation des combles.....	22
<b>Figure 31.</b> Isolation des combles par l'extérieur : un manteau isolant sous la toiture. ....	24
<b>Figure 32.</b> Toiture avec panneaux sandwich .....	25
<b>Figure 33.</b> Caisson chevonné avec isolation acoustique .....	25
<b>Figure 35.</b> Isolation des combles perdus accessibles.....	26
<b>Figure 36.</b> Isolation des combles perdus non-accessibles .....	27
<b>Figure 37.</b> Isolation des murs par l'extérieur.....	28
<b>Figure 38.</b> Schématisation des ITE sous enduit , sous bardage.....	29
<b>Figure 39.</b> Schématisation des ITE sous vêtture / vêlage.....	29
<b>Figure 40.</b> Isolation des murs d'extérieur par l'intérieure.....	30
<b>Figure 41.</b> Isolation des murs par l'intérieur (technique 1).....	31
<b>Figure 42.</b> Isolation des murs par l'intérieur (technique 2).....	31
<b>Figure 43.</b> Isolation du plancher bas.....	32
<b>Figure 44.</b> Remplacement des menuiseries sur un immeuble .....	34
<b>Figure 45.</b> Renforcement du vitrage.....	35
<b>Figure 46.</b> Emplacement de double fenêtre.....	35
<b>Figure 47.</b> Principe du double vitrage. ....	36

<b>Figure 48.</b> Evolution technologique et les exigences élevées des systèmes de chauffage modernes .....	37
<b>Figure 49.</b> Radiateur a panneaux en acier .....	38
<b>Figure 50.</b> Chaudière collective haute performance énergétique .....	39
<b>Figure 51.</b> Pompe à chaleur air-eau .....	39
<b>Figure 52.</b> Fonctionnement d'une chaudière à gaz.....	40
<b>Figure 53.</b> Systèmes de climatisation centralisé.....	40
<b>Figure 54.</b> Système de climatisation issu du logiciel Edificius-MEP .....	41
<b>Figure 55.</b> Unité de refroidissement industriel.....	42
<b>Figure 56.</b> Ventilateurs (Unité extérieure).....	43
<b>Figure 57.</b> Régulation d'un débit d'air variable dans un conduit.....	44
<b>Figure 58.</b> Le thermostat.....	44
<b>Figure 59.</b> Schéma de fonctionnement d'un système de climatisation .....	45
<b>Figure 60.</b> Système refroidissement d'air intérieur .....	46
<b>Figure 61.</b> Climatisation mono split .....	47
<b>Figure 62.</b> Configuration multisplit.....	47
<b>Figure 63.</b> VMC simple flux .....	49
<b>Figure 64.</b> VMC DOUBLE FLUX.....	49
<b>Figure 65.</b> Classification des maisons selon leur bilan énergétique.....	51
<b>Figure 66.</b> Siège du Laboratoire de construction de transport et protection de l'environnement (LCTPE).....	53
<b>Figure 67.</b> Façade sud du laboratoire (entrée principal).....	54
<b>Figure 68.</b> Façade sud (ensoleillé).....	55
<b>Figure 69.</b> Vue de l'intérieur du laboratoire LCTPE.....	55
<b>Figure 70.</b> Disposition des fenêtres du laboratoire LCTPE.....	56
<b>Figure 71.</b> Vue intérieure du plancher haut du laboratoire.....	56
<b>Figure 72.</b> Isolation thermique par l'extérieure avec la laine de verre.....	57
<b>Figure 73.</b> Interface de travail sous COMSOL et organigramme de la simulation .....	59
<b>Figure 74.</b> Coupe en plan du bâtiment étudié (niveau fenêtres).....	60
<b>Figure 75.</b> Coupe en plan du site étudié (niveau murs).....	61
<b>Figure 76.</b> Maillage de la structure.....	62
<b>Figure 77.</b> Conditions aux limites intérieur et extérieurs pour la température.....	63
<b>Figure 78.</b> Flux thermique traversant la paroi depuis l'intérieur (Avant réhabilitation) .....	65
<b>Figure 79.</b> Flux thermique traversant la paroi depuis l'intérieur (Après réhabilitation) .....	66
<b>Figure 80.</b> Comparatif des flux thermique traversant la paroi depuis l'intérieur (W/m) (Avant et Après réhabilitation).....	67
<b>Figure 81.</b> Flux thermique traversant une fenêtre depuis l'intérieur (W/m) (Simple vitrage et double vitrage).....	68

## Liste des tableaux

<b>Tableau 1.</b> Analogie de la résistance avec l'électricité.....	7
<b>Tableau 2.</b> Quelques valeurs de $\epsilon$ .....	14
<b>Tableau 3.</b> Quelques valeurs du facteur d'émission de quelques matériaux de construction pour une température $T=300K$ (environ $27^{\circ}C$ ) .....	14
<b>Tableau 4.</b> La consommation finale par produits .....	14
<b>Tableau 5.</b> La consommation finale par secteur.....	17
<b>Tableau 6.</b> Caractéristiques thermo-physiques des matériaux utilisés.....	61

## Liste des symboles

R : Résistance thermique ( $m^2.K/W$ )

C : capacité thermique surfacique ( $W/m^2.K$ ) T : Température (K)

U : Coefficient de transfert surfacique ( $W/m^2.k$ )

h : Coefficient de transfert de chaleur par convection ( $W/m^2.K$ )

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

t : temps (s)

w : Teneur en humidité ( $kg/m^3$ )

$\Phi$  : Densité de flux de chaleur ( $W/m$ )

$\rho$  : Masse volumique ( $Kg/m^3$ )

$\lambda$  : Conductivité thermique ( $W/m.K$ )

$\alpha$  : Diffusivité thermique ( $m^2/s$ )

Cp : capacité thermique massique du fluide en [ $J/kg.K$ ],

$\lambda$  : conductivité thermique du fluide en [ $W/m.K$ ],

$\mu$  : viscosité dynamique du fluide [ $Pa.s$ ]

# **Introduction générale**

**Introduction générale :**

Le monde entier est confronté à une augmentation de la consommation énergétique d'une façon accrue depuis déjà plusieurs décennies. Cette augmentation remet fondamentalement en cause le modèle économique qui est tributaire pour son développement d'une quantité colossale d'énergie.

En Algérie, un grand nombre de logements ne semblent pas répondre aux exigences du confort thermique et d'économie d'énergie. Cela s'explique par l'absence d'une réglementation spécifique d'une part, par le manque de savoir-faire et une méconnaissance du sujet par les maîtres d'ouvrage. L'amélioration des techniques au niveau des matériaux de construction et d'isolation permet aujourd'hui de réaliser des bâtiments qui rassemblent à la fois les qualités esthétiques et thermiques, tout en offrant un cadre de vie plus confortable en étant consommateur de très peu d'énergie. Les fenêtres et autres surfaces vitrées représentent une part non négligeable des déperditions globales d'énergie par l'enveloppe d'un bâtiment.

Ce mémoire est composé de quatre chapitres :

Après une Introduction générale, Le chapitre 1 expose avec détail la consommation d'énergie en Algérie et la stratégie de la maîtrise de l'énergie en Algérie suivant les données fournis par les organismes spécialisés (APRUE, Ministère de l'énergie ...).

Le chapitre 2 présente une recherche détaillée sur les différents modes de transfert de chaleur dans le bâtiment et les mécanismes de transport de chaleur dans les matériaux de construction, à savoir la conduction, la convection et le rayonnement, en situant les foyers de consommation par secteur d'activité et au sein d'un foyer. Les chemins de déperditions dans un bâtiment ont été clairement mis en évidence. Le chapitre 3 traite de l'efficacité énergétique dans le bâtiment qui vise à réduire la consommation d'énergie tout en maintenant ou améliorant le confort des occupants, nous enchaînons par la suite par une présentation des techniques de réhabilitation énergétique des maisons individuelles et des bâtiments collectifs ainsi que les avantages et les différents travaux de la rénovation. Le chapitre 4 et dernier est consacré à la simulation numérique de la réhabilitation énergétique dans un contexte transitoire d'un bâtiment tertiaire considéré comme énergivore. Une simulation numérique via le logiciel commercial à base d'éléments finis COMSOL- Multiphysiques a été mise en œuvre, elle permet de quantifier les déperditions d'énergie avant et après réhabilitation énergétique. Le travail se termine par une conclusion générale.

# **Chapitre I : La consommation d'énergie en Algérie**

## Chapitre I : La consommation d'énergie en Algérie

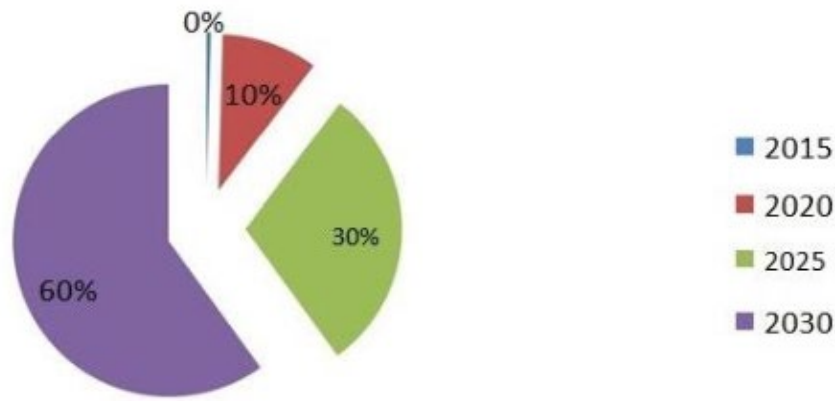
### II.1. Introduction :

La consommation totale d'énergie en Algérie aurait probablement quadruplé entre les années 1980 et 2000. L'électricité, le gaz naturel (sous forme de conduites ou de bouteilles), le fioul, le charbon, le bois et même les piles électriques sont les principales sources d'énergie utilisées dans le secteur domestique. Ces diverses sources d'énergie sont principalement utilisées à des fins différentes :

- ✓ Le chauffage et la climatisation constituent la principale source de dépenses énergétiques dans un foyer, représentant environ 70% de la consommation totale.
- ✓ L'éclairage et l'audiovisuel représentent quant à eux près de 14% de la consommation énergétique domestique.
- ✓ La production d'eau chaude sanitaire nécessite environ 11% de l'énergie totale consommée.
- ✓ Enfin, les appareils électroménagers représentent près de 5% de la consommation énergétique domestique. (RECIQUI, 2017)

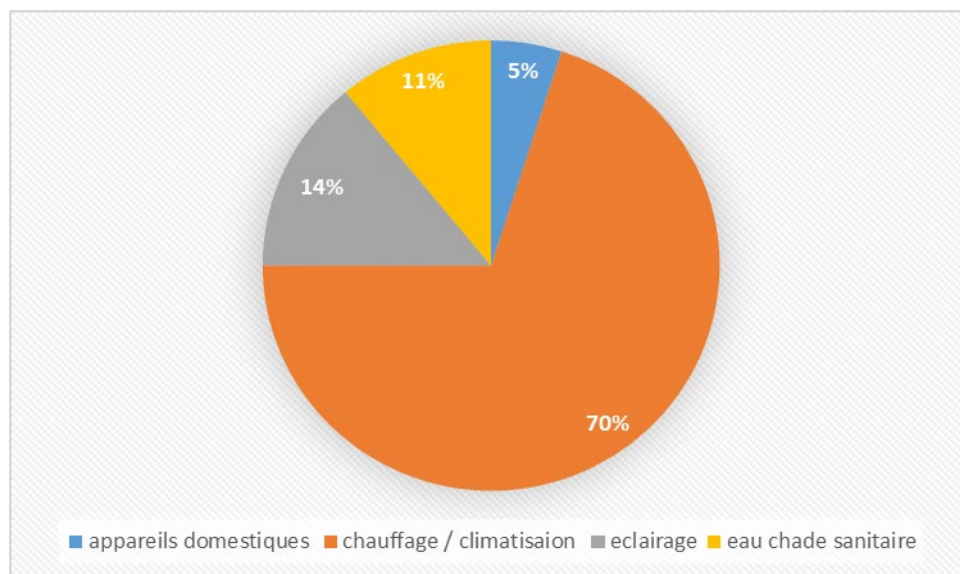
### II.2. La stratégie de la maîtrise de l'énergie en Algérie :

Selon le ministère de l'énergie algérien, la stratégie énergétique de l'Algérie à l'horizon 2030 s'articule autour de l'augmentation de la production et de la rationalisation de la consommation (APRUE, 2016). Pour un objectif de réduire la consommation résidentielle et tertiaire de 10 à 15 % (Zidane, 2019).



**Figure 1.** Emission évitées (en millions de tonnes CO<sub>2</sub>) (APRUE)

Pour cette stratégie, l'Algérie a adopté en février 2011, un programme ambitieux des énergies renouvelables et de l'efficacité énergétique. Toute l'attention des pouvoirs publics est mobilisée afin de réussir ce programme basé sur une stratégie verte (Baouchi, 2014).



**Figure 2.** Dépense énergétique dans un foyer type (APRUE)

Dans un logement, les coûts liés au chauffage et à la climatisation sont les plus importants en termes de consommation d'énergie (Figure 15). Ainsi, il est primordial de prioriser les économies d'énergie sur le chauffage en premier lieu. L'éclairage représente quant à lui 14 % de la consommation d'électricité d'une maison, il est donc nécessaire de trouver des moyens pour le gérer efficacement. De plus, il convient de prendre en compte certains équipements tels que la domotique, les appareils électroniques et les électroménagers.

La consommation d'énergie finale par habitant s'élevait à 0,48 TEP en 1990, passant à 0,71 TEP en 2000, puis à 1,35 TEP en 2010 et enfin à 1,88 TEP en 2020. L'analyse du graphique ci-dessous (figure 1) met en avant que la consommation de gaz et d'électricité pour le chauffage et l'éclairage représente le taux le plus élevé par rapport aux autres consommations ménagères. Cela explique la forte demande dans le secteur de l'habitat, dont le premier besoin est le chauffage en hiver et la climatisation.

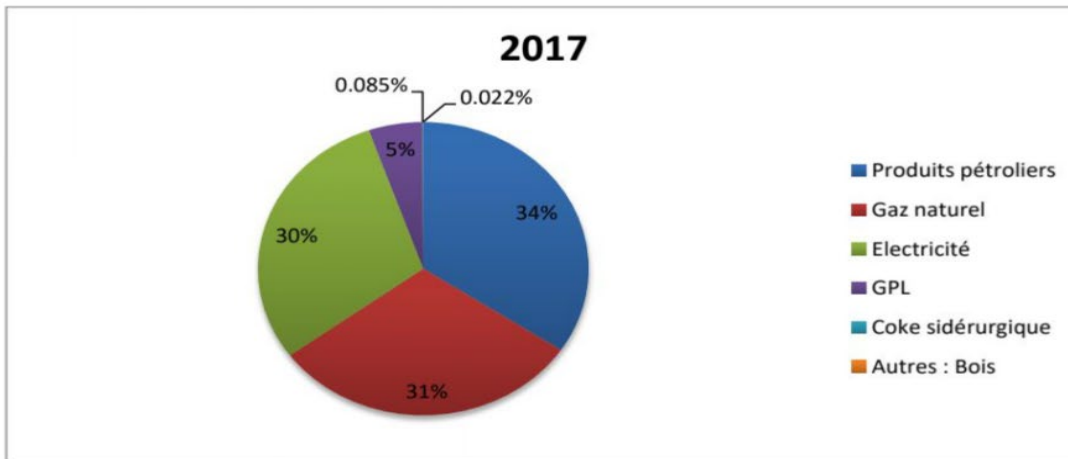
Selon le bilan du secteur pour 2018, la consommation finale est passée de 44,6 M Tep en 2017 à 48,1 M Tep en 2018, reflétant une hausse importante de 3,5 M Tep, soit (+7,8 %), tirée essentiellement par celle du gaz naturel, et un degré moins l'électricité, les GPL et les produits Pétroliers.

### II.3. La consommation énergétique par type d'énergie :

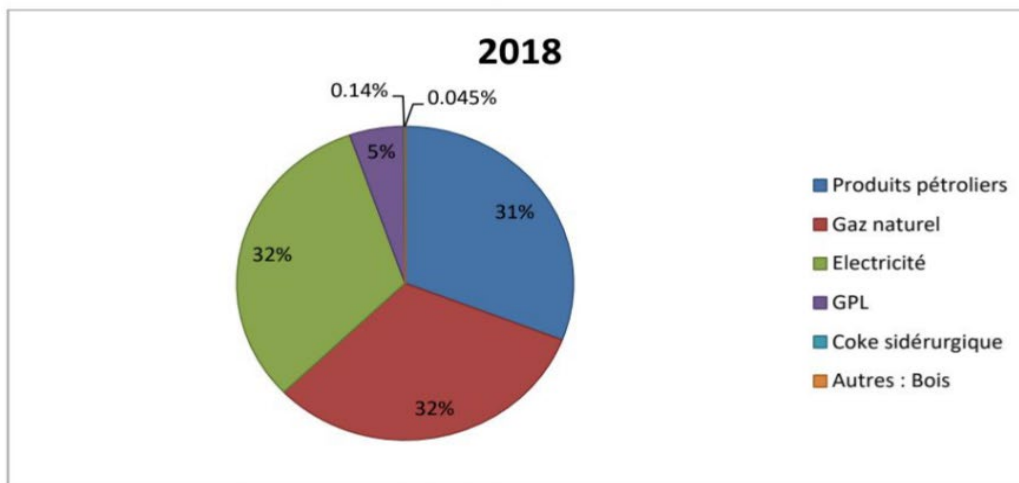
L'évolution par produit est détaillée ci-après dans le tableau suivant :

**Tableau 1.** La consommation finale par produits

Produit	unité	2017	2018	Evolution	
				Quantité	(%)
<b>Produit pétroliers</b>	K Tep	15338	15517	179	1.2
	K tonnes	14664	14843		
<b>Gaz naturel</b>	K Tep	13655	16024	2369	17.4
	10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup>	14449	16956		
<b>électricité</b>	K Tep	13270	16024	656	4.9
	GWh	56376	58153		
<b>GPL</b>	K Tep	2335	2588	253	10.8
	K Tonnes	1979	2193		
<b>Coke sidérurgique</b>	K Tep	38	68	30	80.3
	K tonnes	54	97		
<b>Autres :bois</b>	K Tep	10	22	12	114.1
	K Tep	53	113		
<b>Total</b>	<b>K Tep</b>	<b>44646</b>	<b>48146</b>	<b>3500</b>	<b>7.8</b>



**Figure 3.** Consommation énergétique finale en Algérie par type (APRUE)



**Figure 4.** Consommation énergétique finale en Algérie par type 2018

➤ **Gaz naturel :**

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

➤ **Electricité :**

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

➤ **Produits pétroliers :**

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

#### **II.4. La consommation énergétique par secteur :**

La consommation énergétique selon les différents secteurs est selon l'APRUE (APRUE, 2015b) et le ministère d'énergie. (MEA, 2018). Par secteur d'activité, l'évolution de la consommation finale en 2018, fait ressortir ce qui suit:

➤ **Secteur des transports**

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

➤ **Secteur Industries et BTP**

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

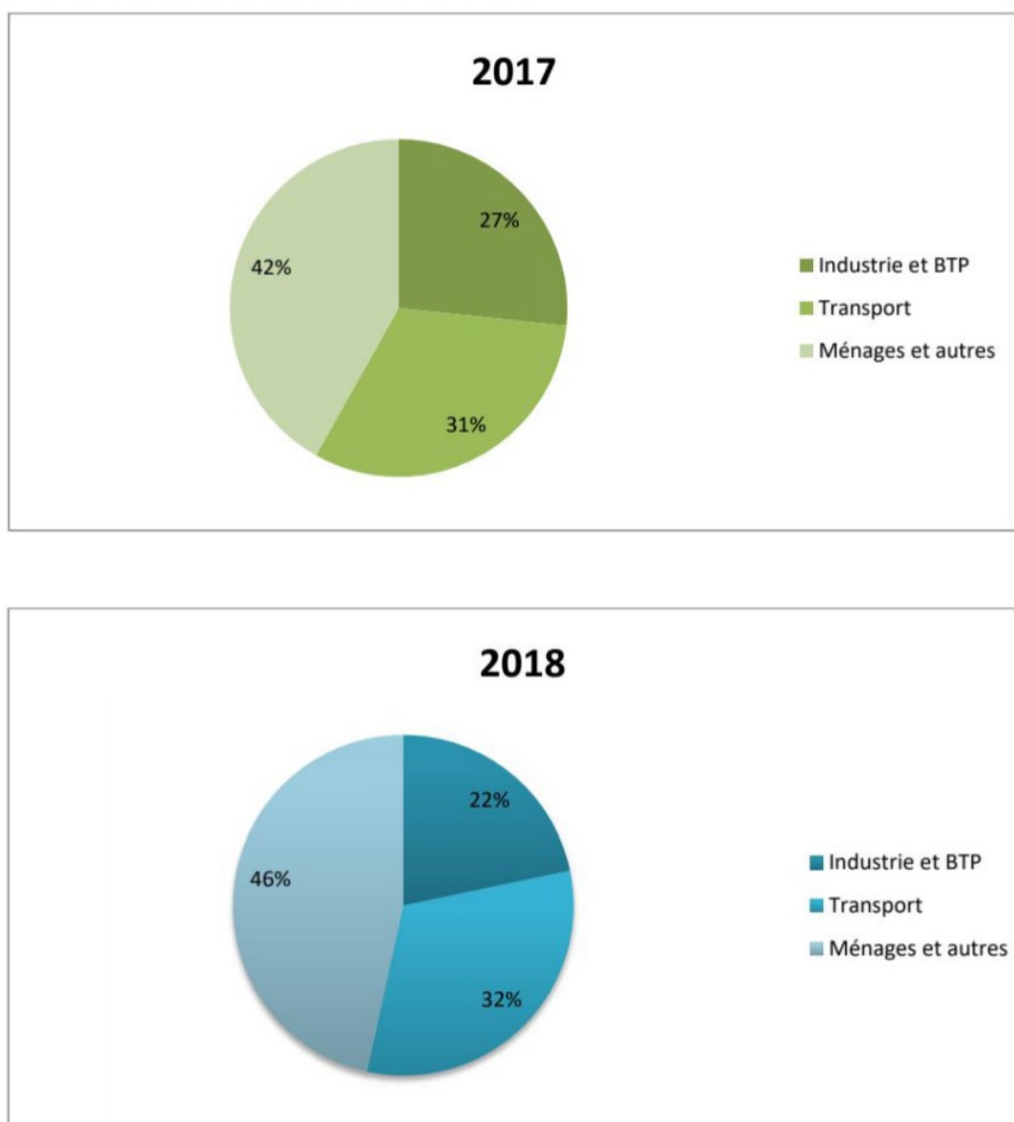
➤ **Secteur ménages et autres**

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

Le détail de la consommation finale par secteur d'activité, est donné le tableau 2 ci-après (MEA,2018) :

Tableau 2. La consommation finale par secteur.

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



**Figure 18.** Consommation énergétique finale en Algérie par secteur (APRUE)

## II.5. Les foyers de consommation d'énergie dans un logement :

### II.5.1 Les équipements :

#### ➤ Chauffage :

Le chauffage est un système de diffusion de chaleur. Il est considéré comme étant le premier élément de dépense énergétique dans le secteur du bâtiment, donc il symbolise le premier degré d'inconfort pour les occupants. Le chauffage représente 70% de la consommation d'énergie d'une maison .

#### ➤ Electricité :

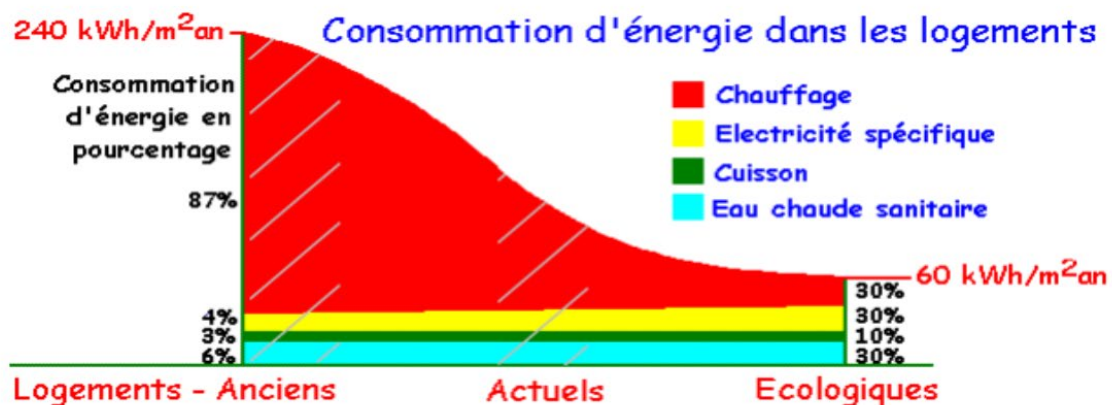
La facture d'électricité a tendance d'augmenter en fonction des saisons, Il est donc important de connaître la consommation des appareils.

➤ **Cuisson :**

Dans un foyer, les appareils de l'électroménager représentent 40% de la consommation d'énergie dans une maison.

**II.5.2 Energie de chauffage orientée eau chaude sanitaire (ECS) :**

En terme de consommation énergétique du bâtiment, l'eau chaude sanitaire représente 6% à 30% de la consommation d'énergie globale dans un logement. L'utilisation de l'eau chaude augmente la facture énergétique, donc il faut penser à utiliser un système d'économie d'eau qui fait baisser le besoin en eau chaude et aussi la facture énergétique. (ABDERAHMEN, 2020)



**Figure 5.** Consommation d'énergie dans les logements (selon les normes françaises) .

○ **Qu'est-ce qu'une déperdition thermique ?**

Une déperdition thermique survient quand l'isolation d'un logement est mauvaise et que son renouvellement d'air n'est pas assuré. Dans ce cas, l'habitation laisse sortir la chaleur par les différents éléments qui constituent la maison ou l'appartement.

Ce n'est pas tout le mur ou toute la toiture qui sont en cause, mais plutôt des zones de rupture que l'on appelle des ponts thermiques. Ils surviennent principalement à la jonction entre deux éléments : fenêtre et mur, toiture et mur, mur et dalle de sol, etc., car l'isolation fait défaut.

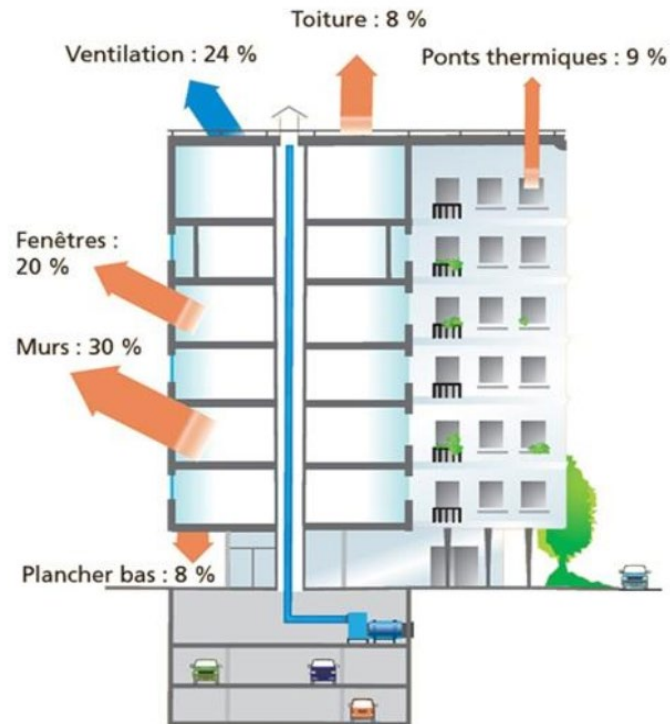


**Figure 6.** Les déperditions thermiques dans une maison individuelle.

### *II.6 Les déperditions thermiques dans un bâtiment :*

La déperdition thermique s'effectue :

- A travers des parois qui séparent milieu intérieur et extérieur (Murs, toitures et plancher bas)
- Par l'intermédiaire des ponts thermiques.
- Par la ventilation mécanique contrôlée (VMC) et les grilles d'aération qui assurent l'indispensable renouvellement de l'air intérieur.
- Les fenêtres et surfaces vitrées qui occupent parfois une large partie des ouvertures de façades



**Figure 7.** Pertes d'énergie dans un bâtiment non isolé (Ademe)

✓ **Toiture : 30% de chaleur perdue**



**Figure 8.** Toiture d'une maison non isolée.

En matière de déperdition thermique, la toiture représente souvent le premier point faible d'un logement avec près de 30% des pertes thermiques. Plusieurs raisons expliquent ce constat:

- Grande surface de contact entre l'intérieur et l'extérieur ;
- Forte exposition au vent, au soleil et aux intempéries ;
- Le fait que la chaleur produite dans l'habitation a tendance à monter et à s'évacuer par le haut du bâtiment

➤ *Les causes de déperdition thermique des toitures sont multiples :*

- Manque d'isolation du dernier plafond ;
- Défaut des sous-pentes ;
- Fuites d'air entre les tuiles ;

C'est pourquoi l'isolation de la toiture et l'isolation des combles sont sans conteste les opérations de rénovation énergétique les plus recommandées par les professionnels.

✓ **Murs : 20% de chaleur perdue**

Les murs sont sur la deuxième marche du podium et suivent de près le toit en matière de déperdition de chaleur avec 20% d'énergie gaspillée. De manière générale, en Algérie, les murs sont plutôt mal isolés, avec uniquement une lame d'air isolante entre les parois en brique.

Pour être efficace, une isolation sera placée de préférence à l'extérieur sur une épaisseur convenable pour atteindre la performance souhaitée. Les isolants de dernière génération sont très performants, même à faible épaisseur. Vous pouvez ainsi isoler parfaitement votre bien sans sacrifier de surface habitable ou votre extérieur.



**Figure 9.** Murs extérieurs en brique non isolé

➤ **Les fuites d'air et le renouvellement de l'air : 20% de perte de chaleur**

Les zones de fuite d'air peuvent être nombreuses dans une maison et souvent mal prises en charge par les artisans et constructeurs.

Elles peuvent provenir des cheminées ; hottes ; serrures ; gaines électriques et menuiseries mal installées ou dégradées. Les fuites d'air peuvent représenter à elles seules l'équivalent d'une fenêtre restant grande ouverte toute la journée.

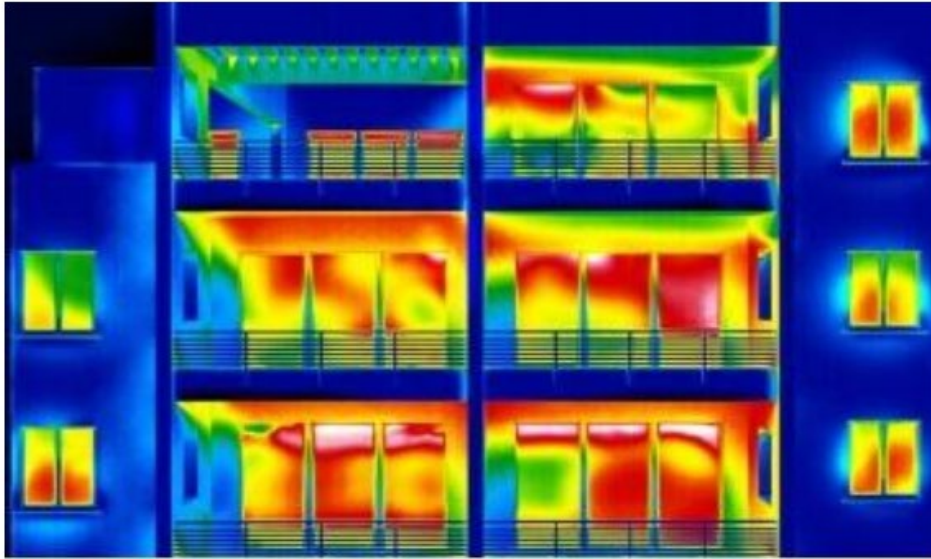


**Figure 10.** Système de renouvellement d'air dans un bâtiment

✓ **Vitrages : environ 15% de chaleur perdue**

Les vitrages représentent la quatrième source de déperdition thermique dans une habitation. Les fenêtres répondent à des critères de fabrication exigeants avec des processus d'élaboration bien maîtrisés pour assurer leur parfaite étanchéité.

En Algérie, les fenêtres sont pour la majorité des constructions existantes en bois et avec un simple vitrage, ce qui représente une source de déperdition d'énergie non négligeable. Les fenêtres doivent donc bénéficier d'une bonne performance thermique en double ou triple vitrage. La figure 25 montre une thermographie d'une façade où l'on peut constater aisément des zones rouges au niveaux des surfaces vitrés synonyme de flux thermique sortant assez important.



**Figure 11.** Thermographie de la façade d'un bâtiment

- ✓ **Le plancher bas : environ 10% de chaleur perdue**



**Figure 12.** Plancher bas d'une maison sans isolation.

Les maisons anciennes sont les plus touchées par une déperdition thermique par le sol, car le plancher bas y est souvent peu isolé. Si ces pertes ne représentent que 10% d'énergie, elles participent quand même à une sensation d'inconfort et de froid à la maison.

## II.7 Programmes en cours de lancement en Algérie :

Les prévisions d'ici 2030 montrent que la production d'énergie primaire couvrira à peine les besoins du marché intérieur. Prenant conscience de cette problématique, l'Algérie a lancé un processus de transition énergétique qui lui permettra de protéger son économie et d'assurer sa sécurité énergétique à long terme. Cette transition est mise en place à travers deux programmes considérés comme priorité nationale. Le premier concerne l'application de mesures d'efficacité énergétique, tandis que le second concerne le développement des énergies renouvelables qui prévoit l'installation d'une capacité de 22 000 MW d'ici 2030.

Les deux programmes, s'ils arrivent à être concrétisés, vont permettre une réduction progressive de la croissance de la demande d'énergie, et l'intégration des énergies renouvelables dans le mix énergétique à hauteur de 40%, tout en contribuant à l'effort mondial de lutte contre les changements climatiques.

Le programme d'efficacité énergétique cible trois secteurs qui impactent fortement sur la demande d'énergie. Il s'agit des secteurs du bâtiment, du transport et de l'industrie. Le programme qui se déploie sur une durée de 15 années vise à atteindre une économie d'énergie globale de l'ordre de 60Mtep d'ici 2030 et 30 Tep au-delà de 2030. Ce programme consiste, principalement, en la réalisation des actions suivantes :

### II.7.1 Isolation thermique des bâtiments :

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

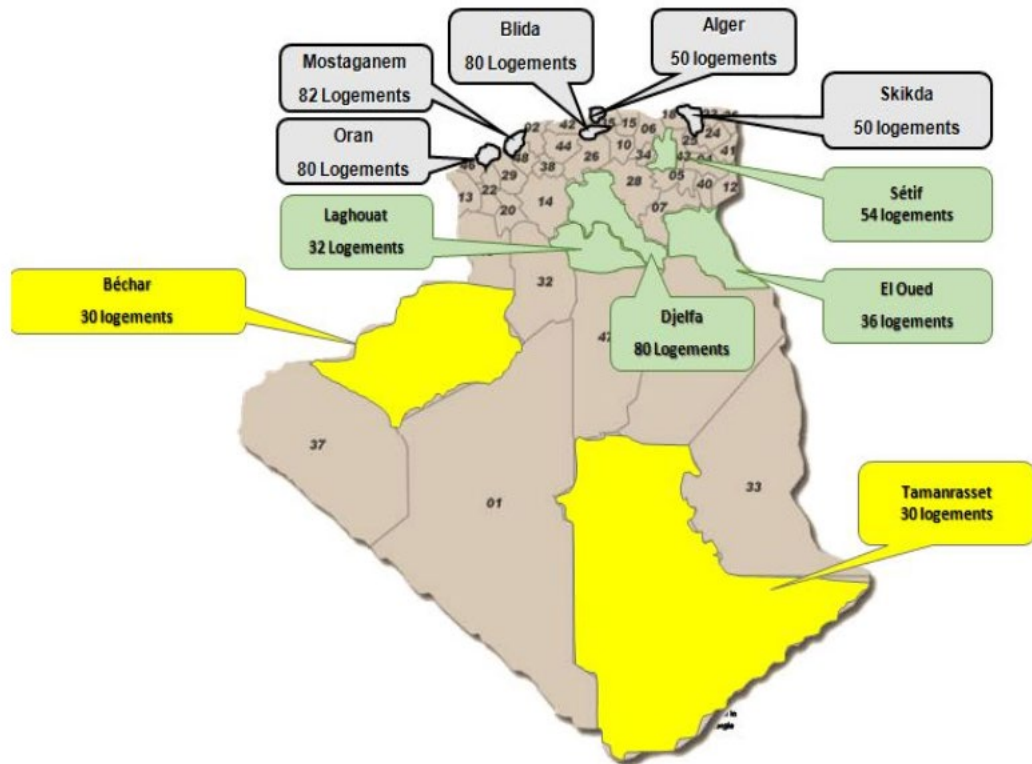


Figure 27. Programme National de l'efficacité énergétique déjà réalisé.

### II.7.2 Développement du chauffe-eau solaire :

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

(MIRA, 2017)

### II.7.3 Généralisation de l'utilisation des lampes à basse consommation d'énergie :

L'objectif, à terme, des actions prévues dans le cadre de ce volet est la substitution de la totalité des lampes à incandescence par des lampes énergétiquement performantes. Pour ce faire, il est prévu, dans une première étape, l'arrêt de l'importation des lampes à incandescence, et l'interdiction de leur commercialisation, dans une deuxième étape. Les gains en énergie escomptés, à l'horizon 2030 avoisineraient 19,5 millions de TEP (APRUE, 2015a). Par ailleurs, la production locale des lampes à basse consommation sera encouragée, notamment, par le recours au partenariat entre les producteurs locaux et étrangers.

### **II.7.4 Introduction de la performance énergétique dans l'éclairage public :**

Le programme de maîtrise de l'énergie dédié aux collectivités locales consiste à substituer la totalité des lampes à mercure (énergivores et nocives) par des lampes plus efficaces (sodium haute pression). Ce qui permettra d'atteindre une économie d'énergie d'un million de TEP, à l'horizon 2030 et d'alléger la facture énergétique des collectivités.

### **II.7.5 La promotion de l'efficacité énergétique dans le secteur industriel :**

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

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

#### **➤ La promotion du gaz de pétrole liquéfié carburant (GPL/c) et du gaz naturel Carburant (GNe) :**

Le programme vise à promouvoir les carburants les plus disponibles et les moins polluants, en l'occurrence, le GPLe et le GNc. L'objectif étant d'enrichir la structure de l'offre des carburants et de contribuer à atténuer les effets des carburants classiques sur la santé et l'environnement.

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

### **II.8 Règlementation thermique Algérienne du bâtiment :**

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

d'eau chaude sanitaire. L'ensemble des parties d'un bâtiment est soumis aux transferts thermiques, qui sont des échanges de chaleur entre le milieu chaud et le milieu froid (généralement de l'intérieur vers l'extérieur). Les lois relatives à la maîtrise d'énergie sont : La loi 09 - 99 du 28 juillet 1999 : Elle est considérée comme une loi cadre relative à la maîtrise d'énergie, son rôle est d'assurer un des objectifs fondamentaux de la politique énergétique en Algérie. Par la gestion rationnelle de la demande d'énergie et fixe des nombreux aspects liés à la maîtrise d'énergie dans le domaine de la construction. Le décret exécutif n° 2000-90 du 24 Avril 2000 : Il porte la réglementation thermique dans les bâtiments neufs à usage d'habitation.

La loi 04 — 09 du 14 Août 2004 : Elle est relative à la promotion des énergies renouvelables dans le cadre du développement durable. Le décret exécutif 04- 149 du 19 Mai 2004 : Il fixe les modalités d'élaboration du programme national de la maîtrise d'énergie. Décret exécutif n° 05-16 du 11 janvier 2005 : Il fixe les règles spécifiques d'efficacité énergétique applicables aux appareils fonctionnant à l'électricité, au gaz et aux produits pétroliers. Arrêté interministériel du 29 Novembre 2008 : Il définit la classification d'efficacité énergétique des appareils à usage domestique soumis aux règles spécifiques d'efficacité énergétique pour ceux qui fonctionnent à l'énergie électrique.

### ***Conclusion :***

Le secteur de bâtiment représente une part importante de la consommation énergétique. Il est considéré comme étant un consommateur du premier degré des énergies et émetteur de gaz à effet de serre. Constatant que les équipements tels que le chauffage et la climatisation consomment un taux non négligeable d'énergie.

Dans la conception des bâtiments, les éléments de structure ont des conséquences significatives sur des différentes pertes énergétiques.

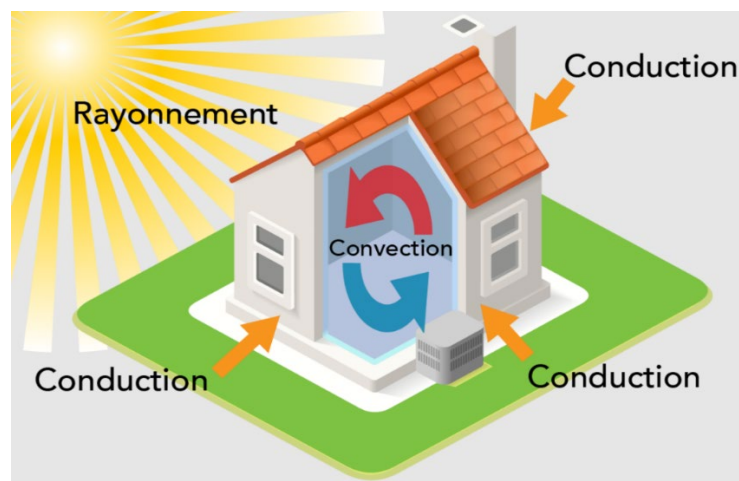
La lutte progressive des sources d'énergie se fait intégralement avec les différentes méthodes classiques et modernes suivant les dernières technologies disponibles sur le marché.

# **Chapitre II : Modes de transfert de chaleur dans le bâtiment**

## I.1 : Introduction aux différents modes de transfert :

Lorsque deux systèmes sont à des températures différentes, le système le plus chaud cède de la chaleur au plus froid. Il y a échange thermique ou encore transfert thermique entre ces deux systèmes. Cette situation se rencontre dans de nombreuses situations industrielles (moteurs thermiques ou même électriques, centrales électriques au fuel au gaz, etc..., électronique), ou domestique (chauffage de l'habitat). Un transfert d'Énergie donne lieu à un flux de chaleur qui correspond à un déplacement de l'énergie du plus chaud vers le plus froid.

Comme on le verra par la suite, le flux de chaleur dont la densité locale est noté  $\phi$  est une grandeur vectorielle, ce qui signifie qu'un flux de chaleur est caractérisé non seulement par son intensité mais aussi par sa direction. Il est défini en chaque point de l'espace et a l'unité d'une densité surfacique de puissance (W/m<sup>2</sup>). Il existe trois modes essentiels de transferts de chaleur: la conduction, le rayonnement et la convection. (GIOVANNINI, Giovannini, A., & Bédard, B. (2012). Transfert de chaleur. Cépaduès., 2012)



**Figure 13.** Les trois modes de transfert de chaleur dans une construction.

### I.1.1. La conduction :

La conduction est un phénomène de propagation de la chaleur à travers un ou plusieurs corps solides en contact direct. Le sens de ce flux thermique va toujours de l'élément le plus chaud vers l'élément le plus froid (fig. 2).

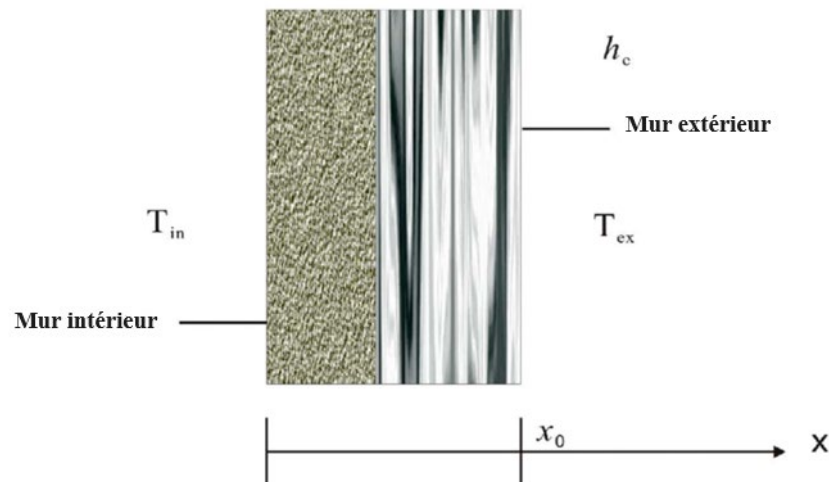


Figure 14. Transfert de chaleur par conduction.

### I.1.2. Grandeurs physiques fondamentales :

#### ➤ Température T

C'est une grandeur physique qui décrit l'état thermique d'un corps et c'est la manifestation mesurable de la chaleur stockée. La température est liée à la moyenne de l'énergie cinétique due au mouvement des atomes et des molécules du corps.

#### ➤ Champ de température

La température est une fonction scalaire  $T(x,y,z,t)$  des coordonnées du repère d'espace-temps. Nous distinguerons deux cas :

- Champ de température indépendant du temps : le régime est dit permanent ou stationnaire.
- Évolution du champ de température avec le temps : le régime est dit variable ou transitoire.

#### ➤ Notion de chaleur Q

La chaleur est un processus de transfert d'énergie sous forme de chaleur. Un corps ne contient pas de chaleur, il en cède ou en reçoit. La chaleur se propage spontanément du corps ayant la température la plus élevée vers celui ayant la température la plus basse : ceci constitue le second principe de la thermodynamique. La chaleur Q s'exprime en Joules (J) ou bien en Watts (W).

➤ **le flux thermique  $\phi$**

Le flux de chaleur  $\phi$  (phi) est la quantité d'énergie ou de chaleur passant au travers de 1m<sup>2</sup> de paroi pendant une seconde lorsqu'il existe un écart de température entre ses 2 faces. Il s'exprime en W/m<sup>2</sup>

$$\phi = \lambda \cdot \frac{\Delta T}{\Delta x} \quad (1)$$

Avec  $\lambda$  la conductivité thermique ;  $\Delta T$  l'écart de température et  $\Delta x$  l'épaisseur de la paroi.

La quantité de chaleur s'échappant d'une paroi simple diminue : lorsque la conductivité thermique décroît, lorsque l'écart de température entre les 2 faces de la paroi diminue ou lorsque l'épaisseur de la paroi augmente.

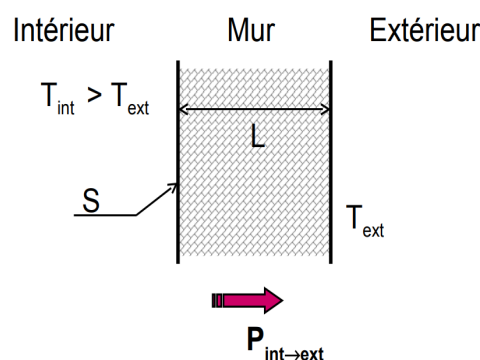
Dans le domaine du bâtiment, les leviers pour limiter la fuite de chaleur sont la diminution de la valeur de la conductivité thermique et l'optimisation de l'épaisseur des parois.

➤ **Densité de flux de chaleur :**

Elle représente la puissance qui traverse l'unité de surface.

➤ **Régime permanent : Loi de FOURIER**

La loi de Fourier (1807) décrit le phénomène de conductivité thermique, c'est-à-dire la description de la diffusion de la chaleur à travers un matériau solide. La théorie de la conduction repose sur l'hypothèse de Fourier : la densité de flux est proportionnelle au gradient de température (Fig. 3). (LETIZIA, 2017)



**Figure 15.** Flux de chaleur traversant la surface S d'un mur.

$$P_{\text{int} \rightarrow \text{ext}} = \frac{dQ_{\text{int} \rightarrow \text{ext}}}{dt} = -\lambda \cdot S / L \cdot (T_{\text{ext}} - T_{\text{int}}) \quad (2)$$

$P_{\text{int} \rightarrow \text{ext}}$  est le flux de chaleur traversant la surface S (W/m<sup>2</sup>)

➤ **La conductivité thermique :**

La conductivité thermique est la faculté d'un matériau à transporter (transférer) de la chaleur par un processus de diffusion appelé conduction thermique. Elle dépend de plusieurs facteurs, nous en citeront les plus importants à savoir :

✓ *La nature des matériaux :*

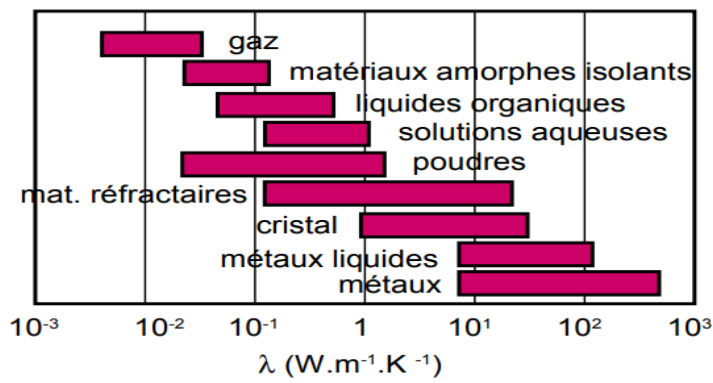


Figure 16. La conductivité thermique de quelques matériaux.

✓ *La température :*

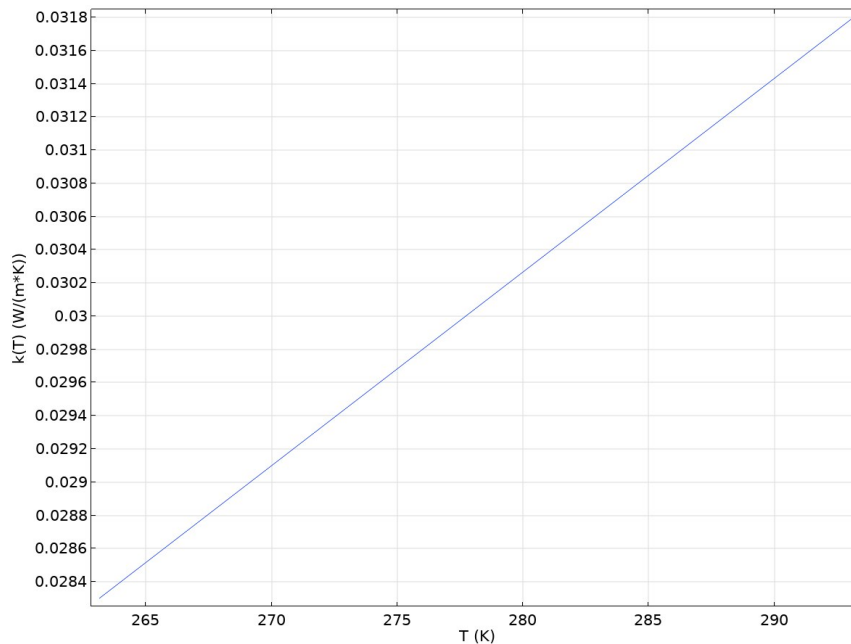
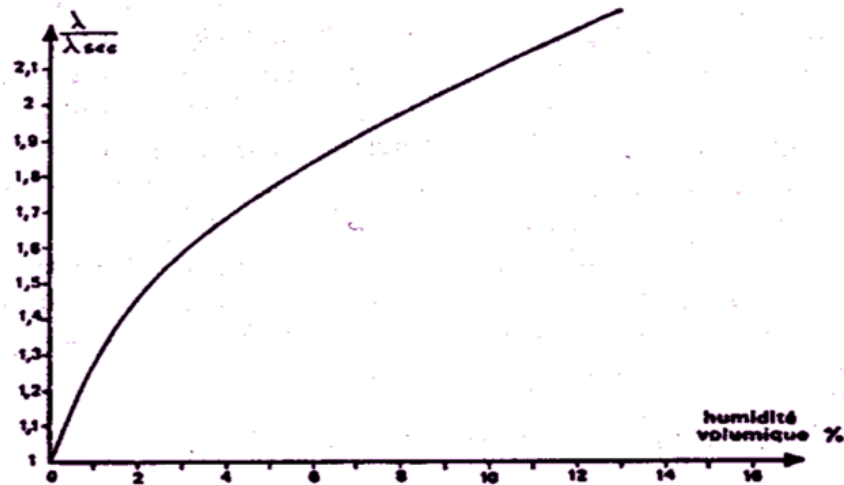


Figure 17. Variation de la conductivité en fonction de la température pour la laine de verre.

✓ *L'humidité*

**Figure 18.** Variation de la conductivité des en fonction de l'humidité pour certains matériaux minéraux ( brique , béton).

➤ **Matériaux isotropes, orthotropes**

Pour un matériaux isotropes (dont les propriétés sont identiques dans toutes les directions) la loi de Fourier s'exprime donc :

$$\vec{q} = \vec{j}_Q \vec{n} = -\lambda \vec{\text{grad}} T \vec{n} = -\lambda \frac{dT}{dn} \quad (3)$$

Lorsque l'orientation des fibres devient importante (bois, aggloméré, laminé), la loi de Fourier devient plus compliquée :

$$dP / dS = -\text{grad}(\lambda.T) = -(\lambda_x .dT / dx \vec{i} + \lambda_y .dT / dy \vec{j} + \lambda_z .dT / dz \vec{k} ) \quad (4)$$

Lorsque le milieu est complètement anisotropique, comme dans les cristaux, la loi de Fourier devient (P V. , 1997) :

$$dP / dS = -(\lambda_{xx} .dT / dx + \lambda_{yy} .dT / dy + \lambda_{zz} .dT / dz) \vec{i} + \dots \quad (5)$$

➤ **Loi de Laplace**

Pour dV à l'équilibre : Pas d'accumulation de chaleur

$$dP / dS = -(\lambda_{xx} .dT / dx + \lambda_{yy} .dT / dy + \lambda_{zz} .dT / dz) \vec{i} + \dots \quad (6)$$

L'équation de Laplace est valable pour un milieu homogène et isotrope, sans sources de chaleur internes, et en régime permanent. En présence de source interne de chaleur volumique  $q$  [W/m<sup>3</sup>] (exemple béton qui fait prise à  $q = 350$  W/m<sup>3</sup>) le raisonnement sur l'équilibre du volume  $dV$  conduit à l'équation suivante :

$$\lambda \cdot \nabla^2 T + q = 0 \tag{7}$$

milieu homogène et isotrope, régime permanent

**I.1.3. Résistance thermique d'un matériau :  $R_{th}$**

Il existe une façon simple d'analyser les problèmes de transfert unidimensionnels : On définit une résistance au passage de la chaleur  $R_{th}$  analogue à celle qui régit le passage du courant électrique.

$$R_{th} = L / \lambda \cdot S \tag{8}$$

On a alors les correspondances suivantes :

**Tableau 3.** Analogie de la résistance avec l'électricité

Thermique			Electricité	
Loi de Fourier	$\Delta T = -(L / \lambda S) \cdot P$	$\leftrightarrow$	$\Delta v = R \cdot I$	Loi d'Ohm
Conductivité thermique	$L / \lambda S \lambda(T)$	$\leftrightarrow$	$\sigma(T)$	Conductivité électrique
température	T	$\leftrightarrow$	V	Potentiel électrique
Puissance thermique	P	$\leftrightarrow$	I	Intensité de courant
Résistance thermique	$L / \lambda S$	$\leftrightarrow$	R	Résistance électrique

On utilise également les mêmes symboles, à savoir :

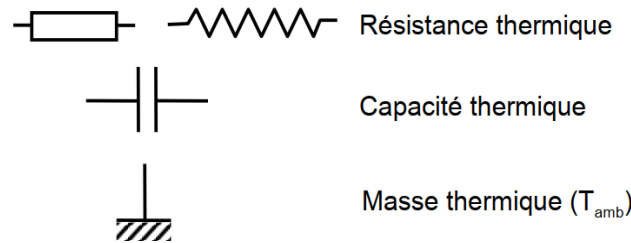


Figure 19. Symboles de la résistance thermiques.

Les mêmes lois sont applicables comme montré en figure 8 :

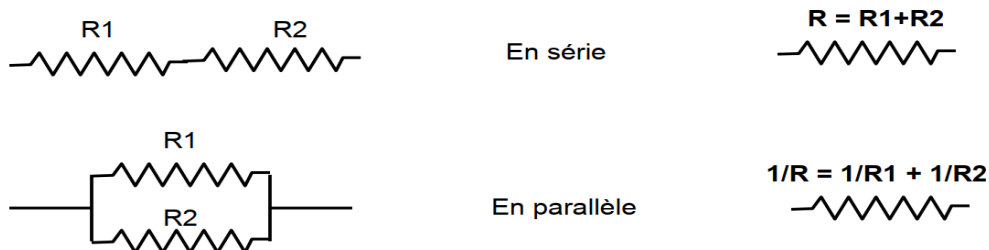


Figure 20. Les lois de la résistance thermique.

**I.1.4. Résistance thermique et coefficient global :**

**Coefficient global de transfert de chaleur :**

Avec des composites, on parle le plus souvent pour caractériser une structure de coefficient global de transfert de chaleur, U, ce qui donne pour l'expression du flux de chaleur total

$$U = 1 / (R_{th} \cdot S) \tag{9}$$

Donc :

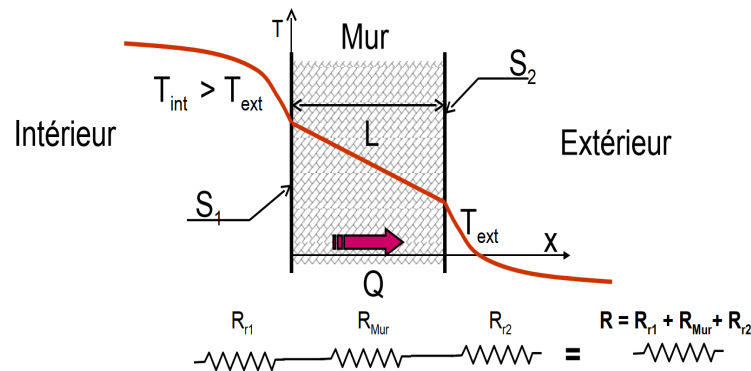
$$U = 1 / (R_{th} \cdot S) \quad [W \cdot K^{-1}] \tag{10}$$

Ce coefficient est largement employé en industrie (même en génie civil sous l'appelation  $U_{bat}$ )

**I.1.5. Résistance de contact fluide/solide :**

De même on définit une résistance thermique d'interface entre un environnement fluide et un solide

$$R_r = (T_{ext} - T_s) / P_{s2 \rightarrow ext} = (T_{s1} - T_{int}) / P_{int \rightarrow s1} = 1 / (h_r \cdot S) \tag{11}$$



**Figure 21.** Résistance thermique d’interface entre un environnement fluide et un solide.

➤ **Régime transitoire :**

L’équation générale de transfert de chaleur par conduction en régime transitoire est donnée par :

$$\rho \cdot Cp \cdot \frac{dT}{dt} = \lambda \cdot \nabla^2 T \tag{12}$$

On définit la diffusivité thermique D qui est une grandeur physique qui caractérise la capacité d’un matériau à transférer la chaleur (énergie thermique) à travers ce matériau. Elle dépend de la capacité du matériau à conduire la chaleur (conductivité thermique) et de sa capacité à accumuler la chaleur (capacité thermique volumique).

$$D = \lambda / \rho \cdot Cp \tag{13}$$

L’équation de transfert est réduite alors en terme de diffusivité sous la forme :

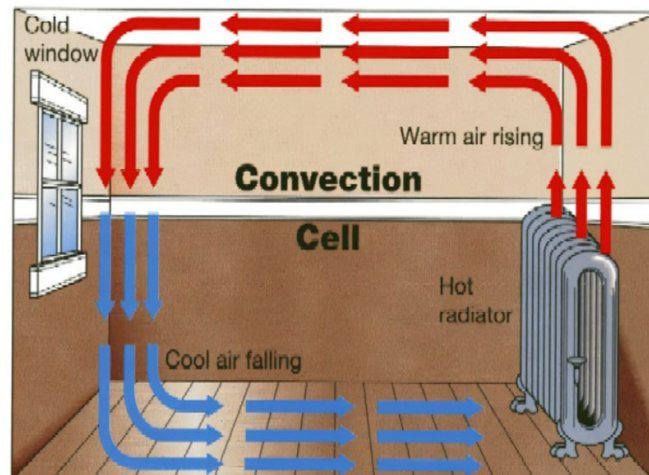
$$\frac{dT}{dt} = D \cdot \nabla^2 T \tag{14}$$

**I.2.1. La convection :**

La convection est un mode de transport d’énergie par l’action combinée de la conduction, de l’accumulation de l’énergie et de mouvement de milieu, elle est considérée comme le mécanisme le plus important de transport de l’énergie entre une surface solide et un liquide ou gaz.

Le transport d’énergie par convection d’une surface dont la température est supérieure à celle du fluide qui l’entoure s’effectue en plusieurs étapes. D’abord la chaleur s’écoule par

conduction de la surface aux molécules du fluide adjacent. L'énergie ainsi transmise sert à augmenter la température est l'énergie interne de ces molécules du fluide. Ensuite les molécules vont se mélanger avec d'autres molécules et transférer une partie de leur énergie.



**Figure 22.** Principe de la convection thermique dans une pièce.

Dans ce cas l'écoulement transporte simultanément, le fluide et l'énergie. L'énergie est à présent, emmagasinée dans les molécules du fluide et elle est transportée sous l'effet de leur mouvement. On peut donc définir la convection comme la réunion de deux modes de transfert de chaleur : *La conduction* qui s'effectue à l'échelle microscopique et *l'advection* qui est de nature macroscopique.

Selon le mécanisme qui génère le mouvement du fluide, on distingue :

### **I.2.2. Convection naturelle (libre) :**

La convection naturelle est due au contact du fluide avec une paroi plus chaude ou plus froide, La convection naturelle dans laquelle le fluide est mis en mouvement sous le seul effet des différences de masses volumiques résultant des différences de températures sur les frontières, cette variation crée un champ de forces gravitationnelles qui conditionne les déplacements des particules fluide.

On retrouve dans plusieurs applications industrielles ce mode de transfert de chaleur. Par exemple, dans les échangeurs de chaleur où deux fluides en mouvement, séparés par une paroi solide s'échangent de l'énergie.

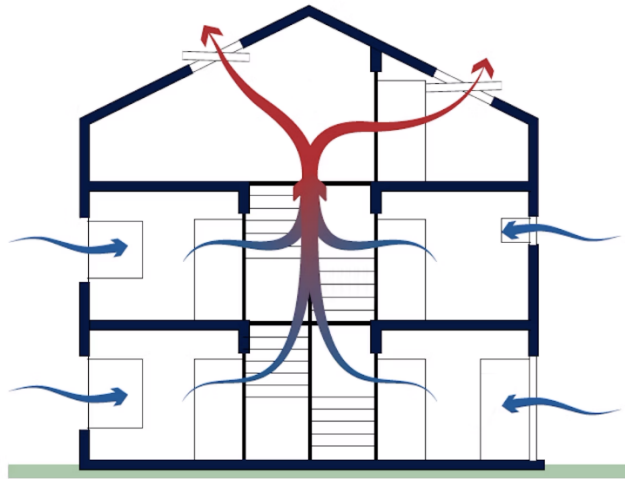


Figure 23. La convection naturelle.

➤ **Analyse dimensionnelle**

Les variables du problème sont les suivantes :

$\rho$ : masse volumique [ $\text{kg/m}^3$ ],

$C_p$ : chaleur spécifique du fluide [ $\text{J/kg.K}$ ],

$\mu$ : viscosité dynamique du fluide [ $\text{kg/m.s}$ ],

$\lambda$ : conductivité thermique du fluide [ $\text{W/m.K}$ ],

$\beta$ : coefficient de dilatation du fluide [ $\text{K}^{-1}$ ],

$D$ : dimension caractéristique de la surface d'échange [ $\text{m}$ ],

$\Delta T$ : différence de température entre le mur et le fluide [ $\text{K}$ ],

$g$ : accélération de la pesanteur [ $\text{m/s}^2$ ],

$h$ : coefficient d'échange [ $\text{W/m}^2.\text{K}$ ]

Les grandeurs fondamentales masse, temps longueur, et température sont utilisées d'après le théorème de Vaschy Buckingham le problème peut s'exprimer en fonction des paramètres suivants :

➤ **Nombre de REYNOLDS**

$$Re = \rho.V.D / \mu \quad (15)$$

$\rho$  : masse volumique du fluide [ $\text{kg/m}^3$ ],

$v$  : vitesse moyenne du fluide [m/s],

$D$  : plus petite dimension géométrique du problème [m],

$\mu$  : viscosité dynamique du fluide [Pa.s].

➤ **Nombre de Nusselt**

$$Nu = h.D / \lambda \quad (16)$$

$h$  : coefficient d'échange convectif en [W/m<sup>2</sup>.K],

$\lambda$  : conductivité thermique du fluide en [W/m.K].

$D$  : plus petite dimension géométrique du problème [m]

➤ **Nombre de Prandtl**

$$Pr = \mu.C_p / \lambda \quad (17)$$

$C_p$  : capacité thermique massique du fluide en [J/kg.K],

$\lambda$  : conductivité thermique du fluide en [W/m.K],

$\mu$  : viscosité dynamique du fluide [Pa.s]

### I.2.3. Convection forcée :

La convection forcée dans laquelle le mouvement du fluide est imposé par une intervention extérieure indépendante des différences de température, La convection est dite forcée quand il existe une cause du mouvement autre que les variations de températures du fluide, cette cause étant la seule à prendre en compte en raison de son importance relative.

Compte tenu du lien entre le transfert de masse et le transfert de chaleur, il est nécessaire de considérer la nature du régime d'écoulement (FRANCE, 2001).

➤ **Expression du flux par convection :**

La loi fondamentale de la convection ou la loi de Newton , traduite par la relation expérimentale de flux de chaleur échangé par convection entre un fluide et une paroi solide.

$$\phi_{con} = hc.S.(T_1 - T_2) \quad (18)$$

$\Phi_{con}$  : Flux thermique par convection (W).

$h_c$  : Coefficient de transfert par convection ( $W/m^2 \cdot ^\circ C$ )

$S$  : Surface de l'élément considéré ( $m^2$ )

$T_1-T_2$  : Différence des températures intérieure et extérieure ( $^\circ C$ )

**Remarque:** Dans le cas d'une paroi de bâtiment, il existe deux coefficient de transmission thermique par convection (interne et externe)  $h_i$  et  $h_e$ .

### 1.3.1. Rayonnement :

Le rayonnement est le troisième type de transfert de chaleur. Contrairement à la convection et à la conduction, aucune matière n'est nécessaire pour le rayonnement. Le rayonnement thermique est le transfert d'énergie par ondes électromagnétiques. Les ondes électromagnétiques transportent l'énergie à travers l'espace. Le rayonnement thermique est la façon dont le Soleil chauffe la Terre. L'énergie du Soleil voyage sous forme d'ondes dans l'espace, et non à travers des atomes ou des molécules. Tout les objets chauds dans la nature émettent également de l'énergie thermique. A titre d'exemple, un micro-ondes utilise aussi un rayonnement pour réchauffer la nourriture. Un bâtiment est sujet au rayonnement sous différentes formes (direct, diffus ou réfléchi) comme le montre la figure 12.

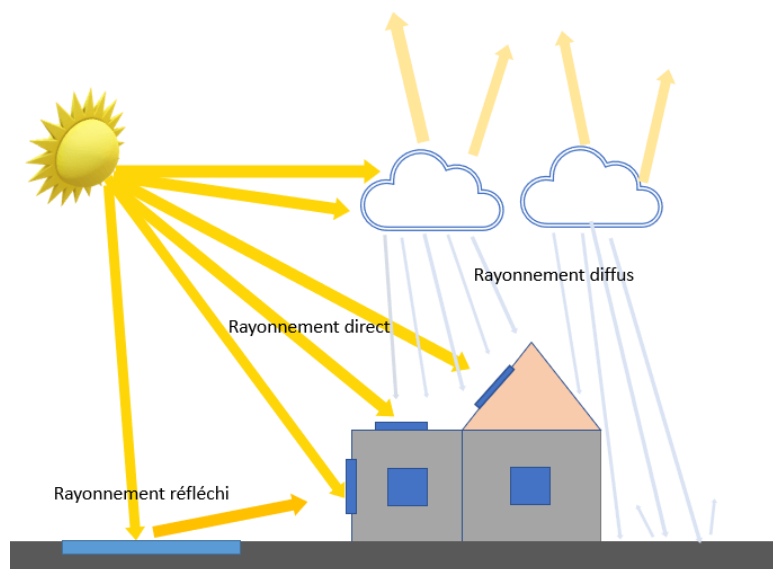


Figure 24. Différentes sources de rayonnement thermique.

#### ➤ Loi de Stefan – Boltzmann

La loi de Stefan Boltzmann permet de déterminer le flux de chaleur  $\Phi$  (W) émis sous forme de rayonnement par un corps de surface  $S$  ( $m^2$ ) dans toutes les directions de l'espace:

$$\phi = \sigma \cdot \varepsilon \cdot S \cdot T^4 \quad (19)$$

Avec :  $\sigma = 5,67 \times 10^{-8} \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-4}$  étant la Constante de Stefan – Boltzmann.

S est la surface en  $\text{m}^2$  et  $\varepsilon$  est le facteur d'émission dépendant de la nature de la surface, avec  $0 < \varepsilon < 1$  et  $\varepsilon$  sans unité.

T : la température absolue du corps en Kelvin

**Tableau 4.** Quelques valeurs de  $\varepsilon$ .

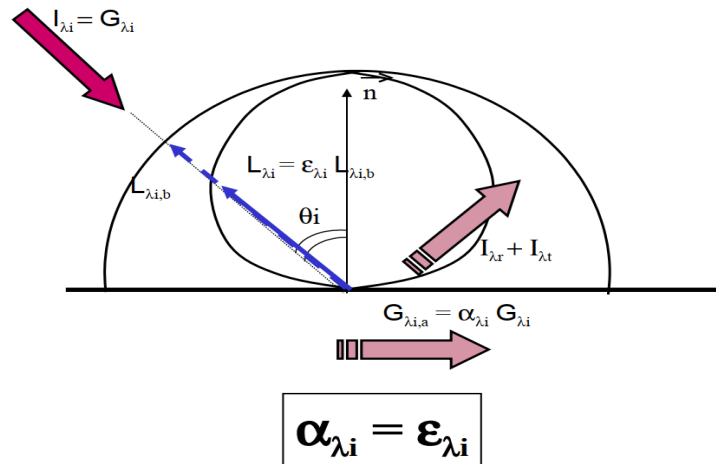
T [°C]	Métaux polis	Surfaces,blanches (brique ,peinture)	Noir de fumée	Peinture,noire,briques sombres
0	0,04	0,95	0,97	0,95
125	0,05	0,94	0,97	0,94
250	0,06	0,88	0,97	0,90
550	0,07	0,70	0,97	0,85
1100	0,14	0,45	0,97	0,80
1600	0,25	0,35	0,97	0,75

**Tableau 5.** Quelques valeurs du facteur d'émission de quelques matériaux de construction pour une température T=300K (environ 27°C)

Matériaux	Facteur d'émission $\varepsilon$
Ciment	0,96
Brique	0,75
Béton	0,93
Liège	0,93
Pierre	0,93
Acier inox	0,25

On remarque que si la température T du corps augmente alors son émission de chaleur par rayonnement augmente aussi.

➤ **Loi de Kirchhoff sur le rayonnement thermique :**



**Figure 13.** Représentation graphique de la loi de Kirchhoff.

Pour un corps arbitraire émettant et absorbant un rayonnement thermique en équilibre thermodynamique, l'émissivité est égale à l'absorptivité. (émissivité  $\epsilon$  = absorptivité  $\alpha$ )

Un corps noir absorbe tous les rayonnements électromagnétiques incidents, indépendamment de la fréquence ou de l'angle d'incidence. Sa capacité d'absorption est donc égale à l'unité, qui est également la valeur la plus élevée possible. Autrement dit, un corps noir est un absorbeur parfait (et un émetteur parfait).

## I.2 Conclusion :

Ce chapitre met en évidence et de manière exhaustive les notions fondamentales de transfert de chaleur par conduction, par convection, mais aussi par rayonnement. Les principales grandeurs physiques fondamentales ont été étudiées et mises en équation.

La conductivité thermique des matériaux dépend de plusieurs facteurs, parmi lesquels, la température et l'humidité.

**Chapitre III : Techniques de  
réhabilitation énergétique des maisons  
individuelles et bâtiments collectifs**

## **Chapitre III : Techniques de réhabilitation énergétique des maisons individuelle et des bâtiments collectif**

### **III.1 Introduction :**

Dans ce chapitre nous allons aborder le concept d'efficacité énergétique (energy efficiency), qui est définie comme étant le ratio entre le service énergétique produit et la quantité d'énergie utilisée pour le produire, ou le rendement de conversion de l'énergie finale en énergie utile, le paramètre d'efficacité correspond à la nature du matériau (laine de verre, fibres végétales, etc.) et son épaisseur (Giraudet, 2011).

Un bâtiment efficace vise donc l'équilibre entre production et consommation d'énergie (réduction de la durée d'éclairage, modération de la température de chauffage. Optimisation les flux...).

Nous allons ensuite enchaîner avec les différentes techniques et procédés de réhabilitations énergétique des bâtiments existants ou en cours de construction.

### **III.2 Performance énergétique d'un bâtiment :**

Le terme de performance énergétique est utilisé pour caractériser énergétiquement les performances de tous produits, ce terme a vu son champ d'application s'étendre quand on a voulu caractériser les bâtiments en vente ou en location, pour déboucher à une démarche réglementaire. Un bâtiment est désigné comme performant lorsque les mesures prises relèvent une réduction presque systématique de la consommation énergétique par rapport à l'objectif calculé. C'est une capacité de limiter au maximum la consommation à l'intérieur de la construction, compte tenu de la qualité de ses équipements (chauffage, climatisation, ventilation...).

### **III.3 Bilan énergétique :**

Le bilan énergétique est une comptabilité des entrées et des sorties d'énergie du bâtiment pendant une période de temps donnée. Ce bilan doit évidemment être équilibré, par conservation de l'énergie. Le bilan énergétique détaille donc toutes les pertes et tous les gains. Avant de calculer le bilan, il convient de délimiter le système étudié dans l'espace et dans le temps, et de définir les utilisations de l'énergie et les vecteurs énergétiques que l'on va considérer.

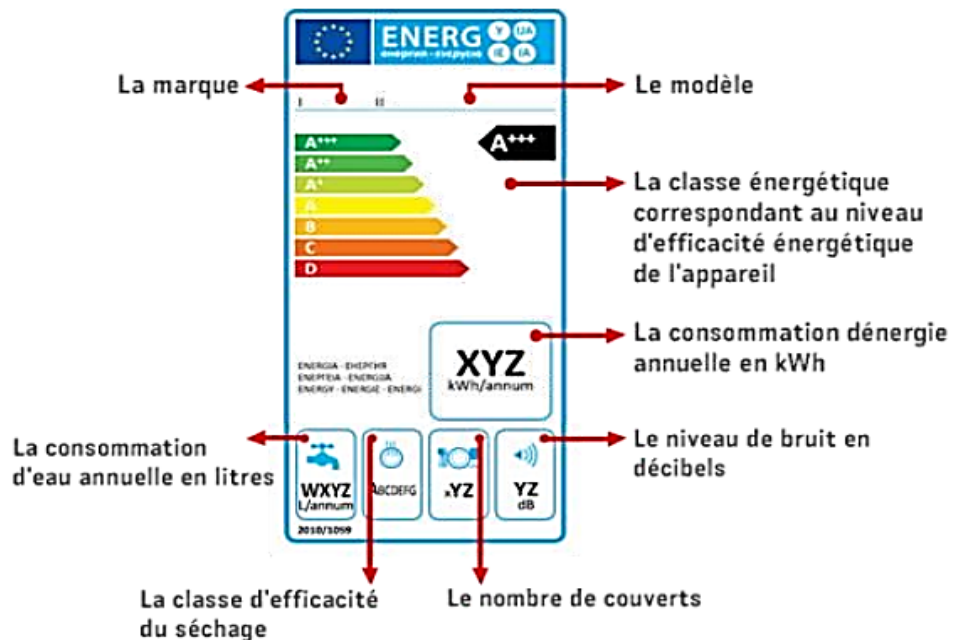
**III.4 Audits énergétiques :**

Procédure visant à évaluer les consommations énergétiques d'un bâtiment, définir et quantifier les économies d'énergie potentielles et rendre compte des résultats (advize, 2019). L'audit énergétique vise à l'étude de l'ensemble des postes consommateurs d'énergie dans un bâtiment, orienter les propriétaires et les usagers vers des actions permettant une réduction de leurs consommations, donc en peut dire un outil d'aide à la décision pour permettre une planification des travaux visant à améliorer l'efficacité énergétique.

**III.5 Étiquette énergétique :**

**III.5.1 Définition :**

L'étiquette-énergie est une fiche destinée au consommateur qui résume les caractéristiques d'un produit, en particulier ses performances énergétiques, afin de faciliter le choix entre différents modèles. Introduit en 1992 pour la plupart des appareils électroménagers, le principe a depuis été étendu à d'autres domaines comme l'automobile et l'immobilier pour permettre au consommateur le choix le plus performant (Wikipédia, 2019). Donc L'étiquette énergétique est utilisée pour caractériser la performance de bâtiment. Actuellement elle représente la carte d'identité des bâtiments.



**Figure 28.** Composants d'une étiquette énergétique pour le classement d'une construction.

### III.5.2 Classe énergie :

- **Étiquette énergétique du bâtiment** : Le (DPE) français importe la méthode qui caractérise la consommation grâce au système des classes.
  1. Dans le cas des bâtiments à usage d'habitation il est prévu sept classes allant de A (bâtiment économe) à G (bâtiment dit énergivore).
  2. Dans le cas des bâtiments à usage principal autre que d'habitation, il est également prévu neuf classes - allant de A (bâtiment économe) à I (bâtiment dit énergivore), mais avec des définitions particulières.

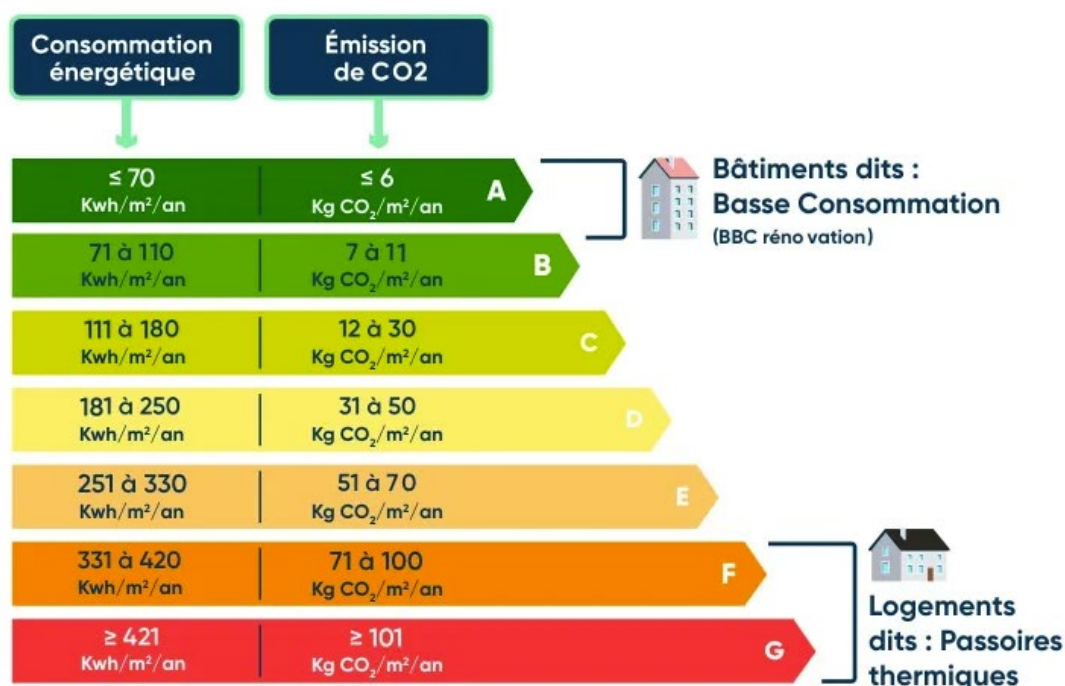


Figure 28. Classement des bâtiments suivants leur consommation énergétique (Effy – France)

### III.5.3 Label Energétique HQE:

Le label HQE cible quatre aspects de la construction et de la gestion d'immeuble :

- **L'écoconstruction** : avec le choix des matériaux, systèmes de conception, harmonisation du bâtiment avec son environnement, et la réduction des nuisances.
- **L'éco-gestion** : au niveau des énergies, gestion de l'eau, déchet d'activités, entretien et maintenance globale.
- **Le confort global de l'occupant** : physiologique (T°et HR%), mais également acoustique, visuel et olfactif. La santé au niveau de la qualité de l'air intérieur , de la qualité des espaces, et de la qualité de l'eau (dossier technique gratuit, 2016).

### **III.6 La rénovation énergétique**

#### **III.6.1 Introduction :**

La rénovation énergétique est un ensemble de travaux visant à optimiser la consommation d'énergie d'un bâtiment, qu'il s'agisse d'une maison individuelle, d'un appartement, d'un bâtiment ou d'un local professionnel. L'objectif principal de la rénovation énergétique est d'améliorer le confort thermique tout en limitant l'impact environnemental.

#### **III.6.2 Les avantages de la rénovation énergétique :**

La rénovation énergétique des bâtiments dispose d'avantages très nombreux pour les propriétaires et les occupants d'un logement.

- **Réduction de l'impact environnemental :** réaliser des travaux de rénovation énergétique est un geste écoresponsable. En consommant moins d'énergie, vous contribuerez à la réduction des émissions de gaz à effet de serre.
- **Économies sur les factures d'énergie :** en améliorant la performance énergétique de votre logement, vous réduirez vos dépenses en énergie, ce qui représente des économies importantes sur le long terme.
- **Amélioration du confort thermique :** la rénovation énergétique permet de créer un environnement intérieur plus confortable en régulant la température et en éliminant les courants d'air.
- **Hausse de la valeur de la propriété :** l'amélioration de la performance thermique d'un bien augmente sa valeur globale.

#### **III.6.3 Les différents travaux de rénovation énergétique**

Lorsque vous envisagez une rénovation énergétique de votre maison ou votre bâtiment, vous devez d'abord définir quels sont les travaux nécessaires. Plusieurs mesures peuvent être à l'origine d'une hausse de l'efficacité énergétique globale. (G)

### **III.7 L'isolation thermique**

L'isolation thermique est l'une des pierres angulaires de la rénovation énergétique. Elle réduit les pertes de chaleur et maintient une température constante à l'intérieur. Plusieurs zones de la maison peuvent être concernées.



**Figure 29.** Thermographie d'une maison individuelle.

### ***III.7.1 Isolation des combles :***

#### **➤ Isoler ses combles pour réaliser des économies d'énergie :**

L'intérêt d'isoler ses combles repose sur un principe bien connu : l'air chaud d'une maison monte toujours. Ainsi, dans une maison non isolée, 30 % de la chaleur émise par vos radiateurs (mêmes ceux du rez-chaussée) s'échappe par le toit. Isoler les combles, c'est donc traiter le principal poste de déperdition d'énergie et réaliser, de fait, jusqu'à 30 % d'économies sur la facture de chauffage.

#### **➤ Isoler ses combles pour profiter d'un meilleur confort thermique et acoustique :**

Outre le fait de mieux conserver la chaleur dans l'habitat lors de la saison hivernale, l'isolation des combles permet de profiter d'une température plus agréable durant la saison estivale. En effet, l'isolant va empêcher les surchauffes à l'intérieur. Par ailleurs, ce type de travaux améliore aussi le confort acoustique de la maison.

#### **➤ Isoler ses combles pour augmenter la valeur de son logement :**

La valeur verte du logement, c'est la plus-value financière qu'apporte à un logement le fait d'être économe en énergie, lié à son diagnostic de performance énergétique. En moyenne, le

prix du bien augmente de 5% par lettre de DPE gagnée, ce à quoi une bonne isolation contribue largement. L'opération est d'autant plus intéressante que, comme nous allons le voir un peu plus bas, les travaux d'isolation d'une résidence principale sont subventionnés par l'état.

### ➤ **Rénover ses combles pour faire un geste écologique :**

En effet, en isolant les combles, on participe également à la protection de l'environnement. Dans ce cadre, le gouvernement a mis en place de nombreuses aides financières aux travaux d'isolation afin d'encourager les particuliers à améliorer les performances énergétiques de leur logement.

#### **III.7.2 Isolation des combles habitables :**

### ➤ **Le point sur l'ITI (Isolation de Toiture par l'Intérieur) :**

Pour une rénovation à moindre coût, l'isolation de toiture par l'intérieur semble être l'alternative la plus adéquate. Plus simple à mettre en place que l'isolation thermique par l'extérieur, ce procédé consiste à appliquer une à deux couches d'isolant d'épaisseur variable placée(s) entre l'ossature et la charpente et accompagnée(s) d'une membrane d'étanchéité ainsi que d'une plaque de plâtre pour la finition.



**Figure 25.** Membrane d'étanchéité pour l'isolation des combles.

Cette technique comporte de multiples avantages. En plus d'être économique, elle permet, en présence d'un pied de pente (mur situé entre le plancher et la sous-pente), de réaliser une

isolation en une seule fois, ce qui contribue à limiter les risques de ponts thermiques (ou ruptures dans la continuité de l'isolation).

Par ailleurs, l'ossature sur laquelle est fixée le parement en plâtre laisse assez d'espace pour faire passer divers réseaux (électricité, eau ...) en toute discrétion, ainsi que pour positionner des interrupteurs. Ne modifiant ni la couverture ni l'aspect extérieur de votre toiture, l'isolation par l'intérieur des combles aménagés ne nécessite aucune autorisation de travaux.

Pour les murs pignons, l'artisan peut employer la technique des panneaux isolants collés. Composée d'un isolant (laine de verre rigide) et d'une plaque de plâtre, cette solution peut être utilisée aussi bien pour les murs pignons en briques ou en parpaings. Néanmoins, saché que pour mettre en œuvre ce type de travaux, il est impératif que les murs ne présentent pas de défauts d'aplomb de plus de 2 centimètres. Cette condition rend cette technique plus adaptée aux constructions neuves.

Côté inconvénients, il faut noter que l'isolation de toiture par l'intérieur cause une perte d'espace plus ou moins importante selon l'épaisseur de l'isolant au sein de l'habitat. Elle aura également un impact esthétique sur la charpente intérieure, dont certaines parties ne seront plus visible après l'opération. Par ailleurs, l'embrasure des fenêtres doit être pensée afin de limiter au maximum les déperditions lumineuses.

Enfin, les combles ne sont pas habitables pendant toute la durée des travaux d'isolation.

#### ➤ **Le point sur l'ITE (Isolation de Toiture par l'Extérieur) :**

L'isolation de toiture par l'extérieur, plus coûteuse et complexe dans sa mise en œuvre, demeure la solution la plus adaptée dans le cadre d'une rénovation totale de votre toit. Idéale à mettre en place pour ne pas perdre d'espace à l'intérieur et conserver toute la beauté d'une charpente, elle permet en outre, en cas de rénovation, de ne pas avoir à vider ses combles pendant les travaux. Côtés inconvénient, outre son prix plus élevé (mais qui inclut une toiture neuve), elle peut modifier légèrement l'aspect extérieur de votre maison et est donc soumise à autorisation préalable de travaux.



**Figure 26.** Isolation des combles par l'extérieur : un manteau isolant sous la toiture.

*L'ITE peut être mise en œuvre selon 4 différents procédés :*

le sarking, le panneau sandwich, le caisson chevronné et le rehaussement de la charpente par mise en œuvre d'un contre chevronnage. Décryptage de chaque technique.

➤ **Le sarking**

La technique du sarking est la plus adaptée pour les maisons aux formes de toitures complexes et aux zones montagneuses. Ce procédé consiste à insérer la couche d'isolant entre la charpente et la couverture, ce qui implique de créer un contre-chevonnage pour supporter le poids de cette nouvelle couche. On dit que l'on crée par ce procédé une sorte de « deuxième toit ». Selon l'épaisseur de l'isolant, la toiture est plus ou moins surélevée (de 20 à 30 cm) mais l'intérieur est quant à lui totalement préservé. Le sarking vous permet alors de garder vos poutres apparentes et votre surface habitable intacte. (P G. , 2012)

Côté revêtement de toiture vous avez le choix, aucune restriction n'est imposée si ce n'est celles du PLU de votre commune.

➤ **Le panneau sandwich**

Rapide et facile à mettre en place, la technique du panneau sandwich présente l'avantage d'être tout en un. En effet, le panneau incorpore la couche d'isolant (laine de roche, mousse de polyuréthane etc.), le support de couverture et le parement intérieur. Les panneaux sont directement posés sur les pannes de la charpente, sans nécessiter de chevrons, et assemblés

entre eux par un système de rainures et de joints qui assure l'étanchéité de la toiture. Ils permettent d'accueillir tout type de couverture.



**Figure 27.** Toiture avec panneaux sandwich

➤ **Le caisson chevronné**

Le caisson chevronné s'apparente au panneau sandwich, à la différence près qu'il intègre des chevrons pour accueillir la couverture.



**Figure 28.** Caisson chevronné avec isolation acoustique

***III.8 Le rehaussement de la charpente par mise en œuvre d'un contre chevronnage :***

Répondant aux exigences des bâtiments basse consommation (BBC), la technique de rehaussement de la charpente par mise en œuvre d'un contre chevronnage est un système

d'isolation entre chevrons. Un pilier de rehausse permet de reconstituer des éléments de charpente dans lesquels on multiplie les couches de laine de verre (3 maximum), pour une isolation thermique et acoustique à son plus haut niveau.



**Figure 34.** Zoom sur l'isolation des combles perdus

Les travaux d'isolation des combles perdus ne s'appréhendent pas de la même manière que lorsqu'il s'agit de combles aménagés. Les techniques vont en effet varier en fonction de la présence ou non de solives apparentes sur le plancher des combles, du type de charpente et de la facilité d'accès aux combles. Découvrez les conseils de nos experts.



**Figure 29.** Isolation des combles perdus accessibles

Lorsque les combles perdus sont accessibles, et que le plancher est plat (pas de solive apparentes), la technique d'isolation consiste à placer plusieurs rouleaux ou panneaux d'isolant directement sur le plancher en une ou deux couches, directement sur le plancher recouvert au préalable d'une membrane d'étanchéité.



**Figure 30.** Isolation des combles perdus non-accessibles

Pour les combles perdus non-accessibles (absence de trappe d'accès, trop faible hauteur sous plafond, charpente fermette), on utilise le plus souvent la technique de soufflage. Rapide et facile à mettre en place, elle nécessite un équipement particulier afin de propulser l'isolant sous forme de flocons de manière égale sur tout le plancher du comble, et sur une épaisseur d'au moins 30 à 35 cm. Il faut noter que cette technique nécessite parfois une préparation du comble (repérage des circuits électrique, protection du conduit de cheminée etc.), ainsi que la pose là aussi d'une membrane d'étanchéité au préalable.

Côté matériaux, quelle que soit la technique employée, les laines minérales sont généralement les plus employées (laine de verre et laine de roche) car elles bénéficient d'un excellent rapport qualité-prix.

#### ***III.9 Isolation des murs :***

Des murs mal isolés sont les deuxièmes responsables, après les combles, des déperditions de chaleur. Deux techniques d'isolation sont possibles. Elles peuvent être combinées pour une efficacité optimale :

- **Isolation par l'extérieur (ITE) :** Cette méthode consiste à ajouter une couche d'isolant sur la façade extérieure du bâtiment. Elle est considérée comme la technique la plus performante, mais implique de modifier l'apparence de la maison ou du bâtiment.

l'ITE va consister à placer une couche d'isolant directement sur la façade, le plus souvent protégée par un bardage.



**Figure 31.** Isolation des murs par l'extérieur

- **Avantages :**

- Traiter un plus grand nombre de ponts thermiques. • Ne pas modifier les surfaces habitables.
- Protéger les murs des variations climatiques (ADEME, 2008a).
- La pose d'une isolation thermique par l'extérieur permet une requalification de l'image d'un bâtiment ou d'un quartier.

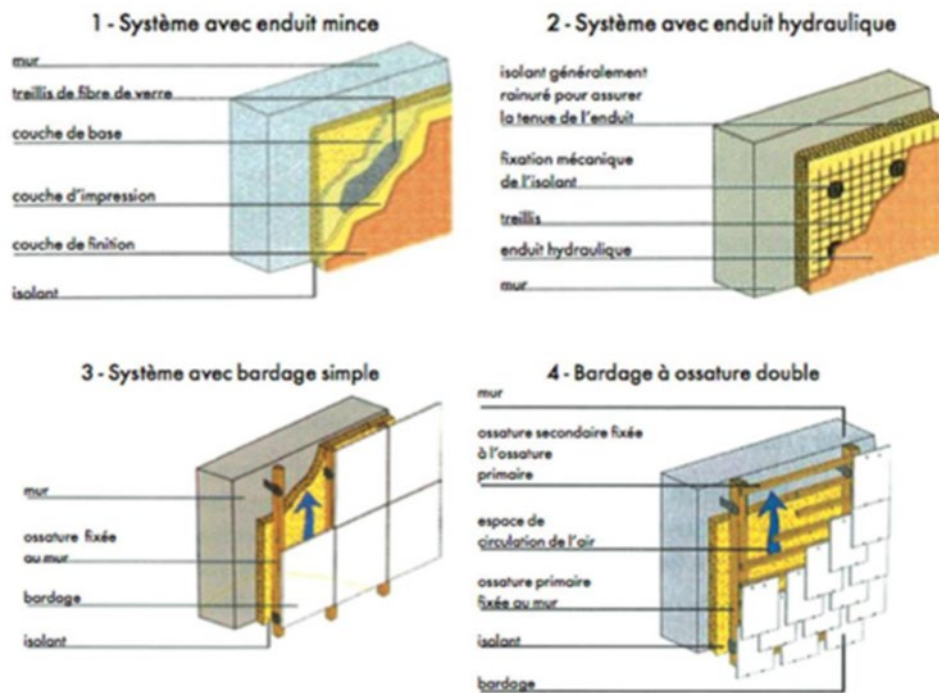


Figure 32. Schématisation des ITE sous enduit , sous bardage

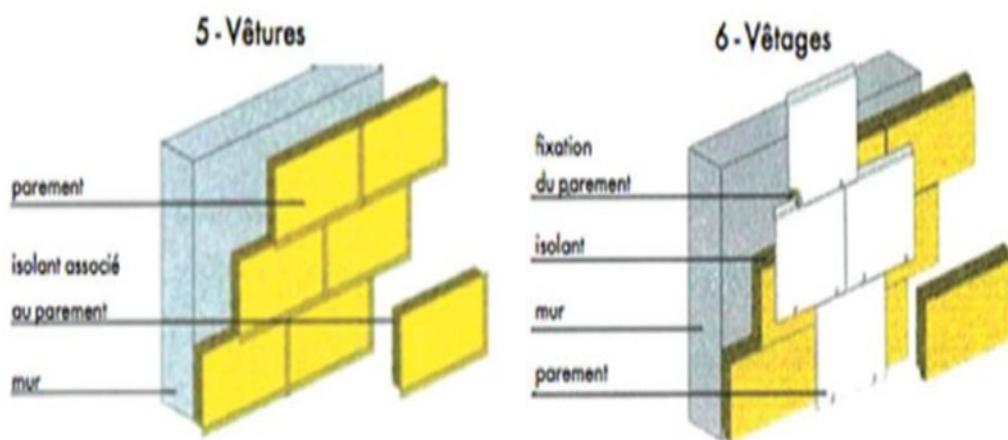


Figure 33. Schématisation des ITE sous vêtture / vêlage

### **Chapitre III : .....Techniques de la réhabilitation énergétique**

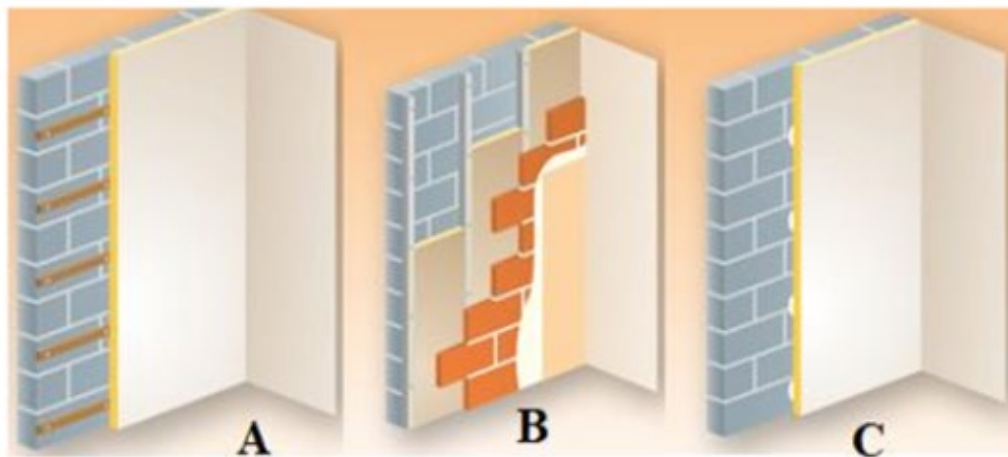
Les revêtements et les peintures peuvent être utilisés pour capter ou non le rayonnement solaire. Ceci est effectué en absorbant le maximum de chaleur dans les climats froids ou en réfléchissant le maximum de rayonnement solaire dans les climats chauds. Dans les climats tempérés, il va falloir chercher un compromis. L'efficacité du mécanisme d'absorption solaire est aussi liée à l'isolation et aux matériaux constitutifs des parois.

Le coefficient d'absorption solaire peut varier de 0.1 à 0.9 selon le type et la couleur du matériau. Un bon choix du coefficient d'absorption des parois opaques et surtout de la toiture peut offrir des économies d'énergie jusqu'à 13% et 45% de réduction de degrés heures d'inconfort d'été.

Isolation des murs d'extérieure Par l'intérieur : L'isolation intérieure des murs extérieurs est réalisée suivant trois méthodes : collage d'un doublage isolant (A).

- pose d'un isolant sur tasseaux de bois vissés au mur (B).
- pose d'un isolant (sur rails métalliques) puis réalisation d'une contre-cloison (C) (Pygmalion, 2015).

Il est préférable de prévoir ces travaux au moment où après le changement des menuiseries, et avant le remplacement de la chaudière dont la puissance pourra être abaissé.



**Figure 34.** Isolation des murs d'extérieure par l'intérieure

#### ➤ **Isolation par l'intérieur (ITI) :**

L'isolation des murs par l'intérieur (ITI) est une solution efficace pour réduire les pertes de chaleur et les factures de chauffage.



**Figure 35.** Isolation des murs par l'intérieur (technique 1)

➤ *Comment isoler les murs par l'intérieur ?*

Pour isoler les murs par l'intérieur, la solution la plus communément utilisée est celle du doublage qui consiste à positionner un isolant contre le mur existant et à le recouvrir par des plaques de plâtre fixées grâce à une ossature métallique. Le nouveau mur peut ensuite être décoré selon votre choix (peinture, tapisserie, bardage).



**Figure 36.** Isolation des murs par l'intérieur (technique 2)

### **III.9 Isolation du sol :**

Lorsque l'on parle d'isolation thermique, il est encore peu fréquent aujourd'hui d'évoquer l'isolation du sol. En effet, pour réaliser des économies d'énergie chez soi, on privilégie généralement l'isolation des murs, celle de la toiture ou encore le remplacement des anciennes menuiseries extérieures. Pourtant, isoler les sols de sa maison est une opération gagnante à de nombreux égards.

Peu coûteux, ce type de chantier permet en plus de réaliser des économies allant de 7 à 10 % sur sa facture énergétique. En outre, il contribue à améliorer le confort des occupants en réduisant la sensation de froid en provenance du sol. Enfin, selon les matériaux utilisés, l'isolation des sols améliore de surcroît l'isolation acoustique du logement.



**Figure 37.** Isolation du plancher bas

- **Isolation des planchers :** L'isolation de plancher doit d'abord par la vérification du bon état de la structure et sa capacité la supporte la charge supplémentaire par l'isolation.
- **Le plancher bas :** C'est un élément très important pour le confort et la salubrité de l'espace intérieure.il doit être traité avec soin .il repose directement sur terre-plein ou sur espaces non chauffés.

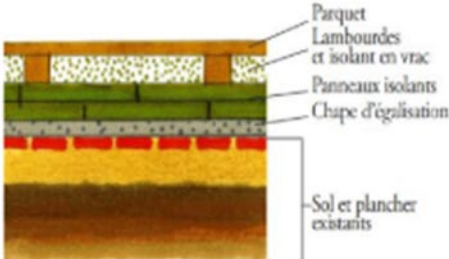
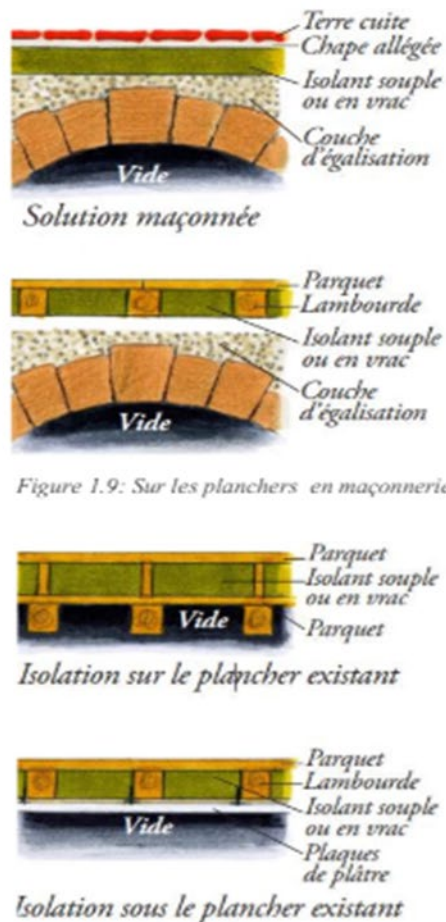
Le plancher bas sur espaces non chauffés.	Le plancher bas sur espaces non chauffés (vide).
<p><b>Le plancher bas sur (terre-plein) :</b> Solution pour les pièces chauffées rapidement ou par intermittence. Ne nécessite pas de réfection lourde du plancher, épaisseur du complément représente une surépaisseur de la valeur d'une marche (environ 16 cm).</p>  <p>Figure 1.8: Complément sur sol existant.</p>	<p>Soit un ajout sur le revêtement existant si le niveau du sol l'autorise, soit après suppression du revêtement existant. L'isolation peut être maçonnée ou à sec.</p>  <p>Figure 1.9: Sur les planchers en maçonnerie.</p> <p>Figure 1.10: Sur les planchers en bois.</p>

Tableau III.1 Isolation des planchers

- **Les planchers intermédiaires :** L'isolation thermique des planchers intermédiaires ne se justifie que s'il existe des différences de températures souhaitent d'un niveau à l'autre.

### III.10 Changement des menuiseries :

Les menuiseries désignent l'ensemble des ouvertures d'un logement. Elles regroupent les fenêtres, les portes-fenêtres, la porte d'entrée, ainsi que les occultants associés à ces ouvertures tels que les volets. Les menuiseries assurent plusieurs rôles pour votre habitat. Elles permettent de laisser entrer la lumière, d'accéder à l'extérieur et de protéger des intrusions indésirables

(humidité, froid, regards indiscrets...). Cette fonction isolante est primordiale pour le confort de votre logement.

Ainsi, le remplacement de menuiseries défailtantes peut permettre une diminution jusqu'à -15% des déperditions thermiques d'un logement. Les zones particulièrement concernées par ces déperditions sont les parois vitrées, telles que les fenêtres et les portes-fenêtres.



**Figure 38.** Remplacement des menuiseries sur un immeuble

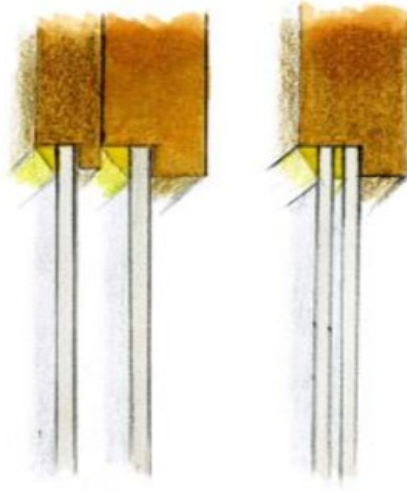
#### ***III.10.1 Isolation des parois vitrées :***

La réhabilitation des menuiseries doit faire l'objet d'une réflexion globale (architecturale, acoustique, thermique, aéraulique) et d'un examen attentif des fenêtres et des portes préexistantes .

Elles sont les plus vulnérables aux déperditions calorifiques. Leurs améliorations thermiques permettent des économies d'énergie de l'ordre de 10 à 15 % .Et cela par le remplacement des vitrages simples en vitrages isolants, et le redimensionnement des surfaces vitrées selon l'orientation et la zone climatique .

Les solutions pour améliorer la performance des fenêtres existante sont :

- **Le survitrage :** Il s'agit de rapporter un second vitrage sur les ouvrants d'une fenêtre existante.



**Figure 39.** Renforcement du vitrage

➤ **Le vitrage à isolation renforcée VIR :**

il est constitué généralement de deux lames de verre enfermant un gaz (argon ) dont la surface extérieure de la vitre intérieure est revêtue d'un film peu émissif réfléchissant le rayonnement infrarouge(Kadri and Mokhtari, 2012).

➤ **La pose d'un double fenêtrage :** cette opération consiste à placer une deuxième fenêtre soit en avant ou en arrière de la fenêtre existante (selon sa position par rapport au mur)

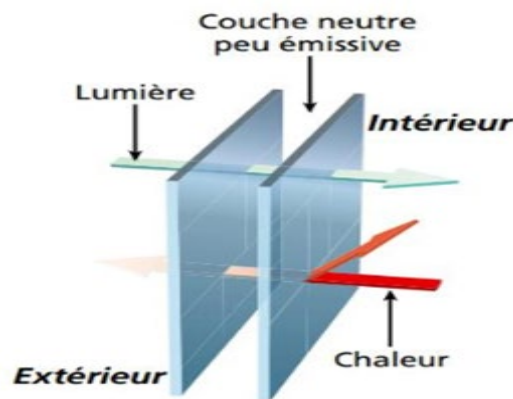


**Figure 40.** Emplacement de double fenêtre

➤ **Double vitrage :** constitué de deux feuilles de verre assemblées et scellées

en usine, séparées par un espace hermétique clos renfermant de l'air ou un autre gaz déshydraté(Energie+, 2019).

- Il peut permettre des économies de chauffage de l'ordre de 10 % et améliore fortement les conditions de confort(ADEME, 2008a)
- La présence de la lame d'air permet de limiter les pertes de chaleur par conduction, la conductivité thermique de l'air (0.025 W/mK (à 10°C) étant nettement inférieure à celle du verre (1 W/mK).
- Isolation phonique jusqu'à 45 dB (avec vitrage approprié) ,Épaisseur des ouvrants 80 mm(Internorm, 2012/13). C'est la solution la plus performante. Il est recommandé de choisir des fenêtres équipées d'un double vitrage à isolation renforcée (VIR)



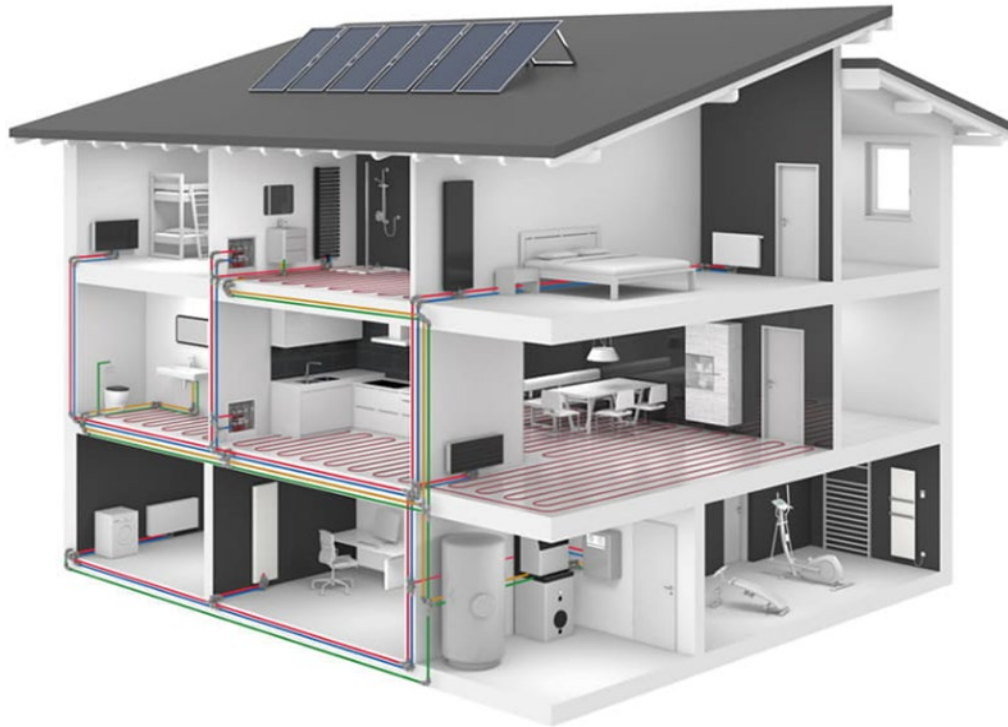
**Figure 41.** Principe du double vitrage.

### **III.10.2 La modernisation du système de chauffage et de climatisation :**

#### **➤ Systèmes de chauffage modernes :**

Les systèmes de chauffage modernes d'aujourd'hui sont éloignés des anciens poêles utilisés depuis 100 ans et offrent la possibilité de chauffer les bâtiments modernes d'une manière plus économique et plus durable. Cependant, comme les bâtiments deviennent de plus en plus compacts et que nos systèmes de chauffage ont évolué, une planification précise et une bonne exécution par un professionnel sont plus importantes que jamais.

C'est le système de chauffage le plus répandu actuellement dans les nouvelles construction en Algérie notamment dans les logements promotionnels et les villas individuelles.



**Figure 42.** Evolution technologique et les exigences élevées des systèmes de chauffage modernes

➤ **Radiateurs modernes**

Dans le cas des radiateurs panneaux, le principal objectif d'amélioration au cours des dernières décennies a été d'augmenter les performances. Il faut tenir compte d'un certain nombre de situations différentes, telles que l'acheminement interne de l'eau de chauffage ou les plaques dites de convection. Sur ces plaques entre les plaques avant et arrière du radiateur, l'air chauffé monte comme dans une cheminée. La forme et la disposition déterminent la puissance calorifique ultérieure du radiateur.

Au fil des ans, le contenu des canaux d'eau du radiateur est devenu plus petit, mais grâce aux plaques de convection, la surface rayonnant la chaleur est devenue plus grande. Cela signifie que moins d'eau et moins d'énergie sont nécessaires pour une performance supérieure et une réaction plus rapide aux variations de charge calorifique. Aujourd'hui, il existe même des ventilo-convecteurs, tels que l' iVectorS2, qui peuvent fonctionner à des températures inférieures à 45 °C.



**Figure 43. Radiateur a panneaux en acier**

➤ **Des systèmes modernes de chauffage par le sol :**

Les exigences relatives à un système de chauffage par le sol sont élevées. Il faut s'efforcer, par exemple, d'obtenir : une hauteur d'installation réduite, une puissance calorifique élevée et une installation rapide et facile. Aujourd'hui, il existe des systèmes de chauffage par le sol qui réagissent beaucoup plus vite que leurs prédécesseurs. Par exemple, les systèmes hautement dynamiques ts14 R.

- Chaudière à haute efficacité énergétique : ces chaudières utilisent moins de combustible pour produire de la chaleur, ce qui réduit la consommation d'énergie



**Figure 440.** Chaudière collective haute performance énergétique

- **Pompe à chaleur** : les pompes à chaleur puisent l'énergie dans l'air, l'eau ou la terre pour chauffer ou refroidir votre espace de manière efficace sur le plan énergétique.



**Figure 45.** Pompe à chaleur air-eau

- **Système de chauffage au gaz à condensation** : ce système récupère la chaleur latente de la vapeur d'eau contenue dans les gaz de combustion.

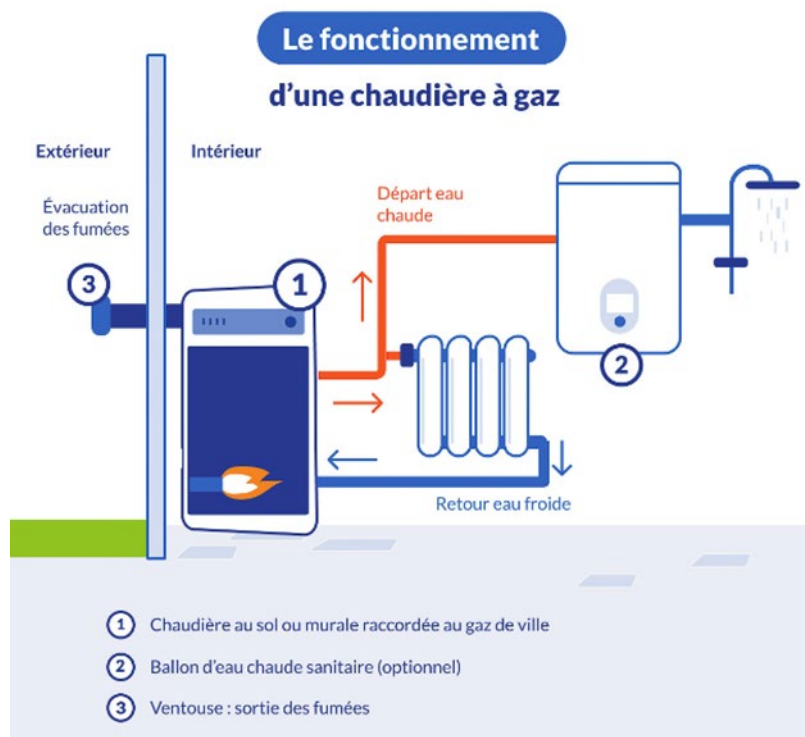


Figure 46. Fonctionnement d'une chaudière à gaz

L'investissement dans la régulation du chauffage est tout aussi crucial que le choix du système de chauffage lui-même. Les thermostats intelligents, les robinets thermostatiques et la programmation horaire contribuent à un chauffage efficace et économe en énergie, tout en garantissant un confort optimal.

➤ **Les systèmes de climatisation**

Le système de climatisation est un système mécanique utilisé pour assurer le confort thermique et la qualité de l'air dans les bâtiments que nous habitons.



Figure 47. Systèmes de climatisation centralisé

la conception d'un système de climatisation peut être facilitée avec un logiciel BIM pour les systèmes MEP



**Figure 48. Système de climatisation issu du logiciel Edificius-MEP**

Les systèmes de climatisation sont des systèmes conçus pour contrôler et réguler les conditions environnementales à l'intérieur d'un bâtiment afin d'assurer un confort thermique adéquat. Ces systèmes sont largement utilisés dans divers types de structures, telles que les résidences, les bureaux, les centres commerciaux, les hôpitaux et les hôtels.

L'objectif principal des systèmes de climatisation est de manipuler la température, l'humidité et la qualité de l'air à l'intérieur d'un environnement spécifique. Ces systèmes jouent un rôle essentiel pendant les différentes saisons, fournissant du refroidissement pendant les périodes chaudes et du chauffage pendant les périodes froides. Les systèmes de climatisation contribuent également à améliorer la qualité de l'air intérieur grâce à un système de filtration qui capture les particules, les allergènes et autres contaminants.

Il existe principalement deux types de systèmes de climatisation : ceux conçus pour le refroidissement et ceux conçus pour le chauffage. Les systèmes de climatisation pour le refroidissement éliminent la chaleur de l'environnement intérieur en utilisant des réfrigérants pour absorber la chaleur de l'air et la dissiper à travers un cycle de compression et d'expansion. D'autre part, les systèmes de climatisation pour le chauffage fournissent de la chaleur à

l'environnement intérieur pendant les périodes les plus froides, en utilisant différentes sources d'énergie telles que le gaz naturel et l'électricité.

### **III.11 Analyse des composants des systèmes de climatisation :**

#### **➤ Unité de refroidissement**

L'unité de refroidissement représente le cœur technologique des systèmes de climatisation. Composée d'éléments tels que le compresseur, l'évaporateur, le condenseur et la valve d'expansion, cette partie cruciale du système travaille en synergie pour manipuler le réfrigérant et réguler la température de l'air intérieur. Le compresseur joue un rôle clé, comprimant le réfrigérant et augmentant sa température et sa pression. L'évaporateur, par la suite, absorbe la chaleur de l'air intérieur, transformant le réfrigérant de liquide en gaz. Le condenseur libère la chaleur dans l'environnement extérieur, faisant à nouveau condenser le réfrigérant en liquide. Enfin, la valve d'expansion réduit la température et la pression du réfrigérant, complétant le cycle. (Modélisation et caractérisation expérimentale d'un évaporateur à mini-canaux de climatisation automobile fonctionnant au CO<sub>2</sub>, 2007)



**Figure 49.** Unité de refroidissement industriel

#### **➤ Ventilateurs**

Les ventilateurs, essentiels au fonctionnement des systèmes de climatisation, se divisent en deux catégories principales : ceux de l'unité de refroidissement et ceux de l'air. Les premiers poussent l'air à travers l'évaporateur et le condenseur, tandis que les seconds distribuent l'air

conditionné dans les environnements. Cette combinaison garantit une circulation d'air correcte, contribuant à l'efficacité globale du système.



**Figure 50.** Ventilateurs (Unité extérieure)

➤ **Réseaux de conduits**

Les conduits, constituant un réseau de tubes, représentent le système de transport de l'air entre l'unité de refroidissement et les environnements à conditionner. Fabriqués en métal ou en matériaux flexibles, ces conduits sont équipés d'ouvertures de ventilation et de régulation pour contrôler la direction et le flux d'air. Un composant souvent négligé mais crucial pour l'efficacité générale du système.



**Figure 51.** Régulation d'un débit d'air variable dans un conduit

➤ **Thermostat :**

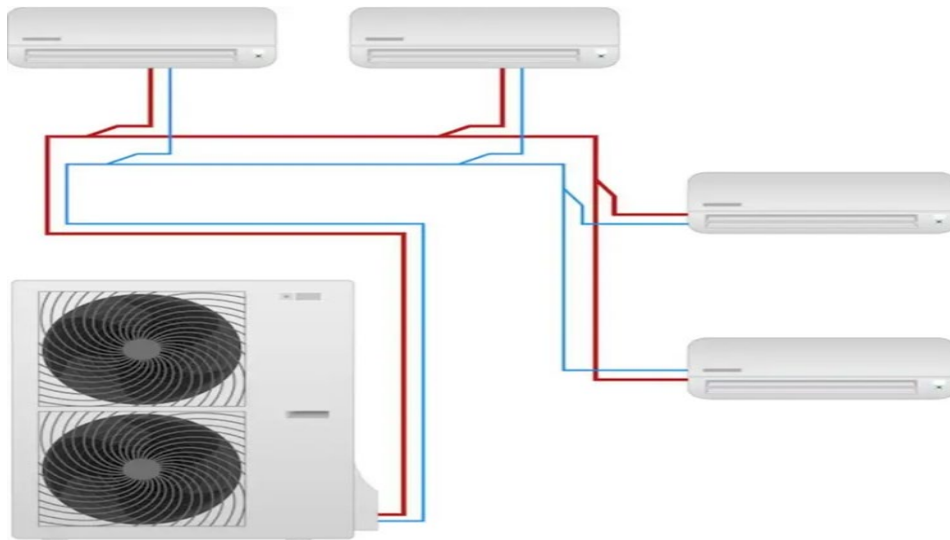
Le thermostat, cœur battant du contrôle, permet de régler la température désirée. Programmable pour maintenir des niveaux spécifiques, le thermostat va au-delà, contrôlant également des paramètres tels que la vitesse du ventilateur et les modes de fonctionnement du système, assurant un contrôle total et personnalisé du système.



**Figure 52.** Le thermostat

➤ **Filtres à air**

Essentiels pour améliorer la qualité de l'air intérieur, les filtres à air éliminent les particules, la poussière, les allergènes et autres contaminants. En plus de protéger le système contre la saleté et les débris, ces filtres contribuent à créer un environnement intérieur plus sain.



**Figure 53.** Schéma de fonctionnement d'un système de climatisation

Les systèmes de climatisation fonctionnent en utilisant des principes thermodynamiques et des cycles de réfrigération pour réguler la température, l'humidité et la qualité de l'air à l'intérieur d'un environnement. Voici une explication détaillée du fonctionnement de base d'un système de climatisation

### ***III.12 Refroidissement de l'air :***

- **compression du réfrigérant :** le cycle commence avec le compresseur, qui comprime le réfrigérant, augmentant sa température et sa pression .
- **condensation du réfrigérant :** le réfrigérant à haute pression et température passe à travers le condenseur, où il cède la chaleur à l'environnement extérieur et se condense en liquide .
- **expansion du réfrigérant :** le réfrigérant liquide à basse pression et température passe à travers une valve d'expansion, se dilatant rapidement et diminuant encore la température .
- **refroidissement d'air intérieur :** le réfrigérant à basse pression et basse température entre dans l'évaporateur, où il absorbe la chaleur de l'air intérieur, se transformant de liquide en gaz. Ce processus refroidit et déshumidifie l'air intérieur .

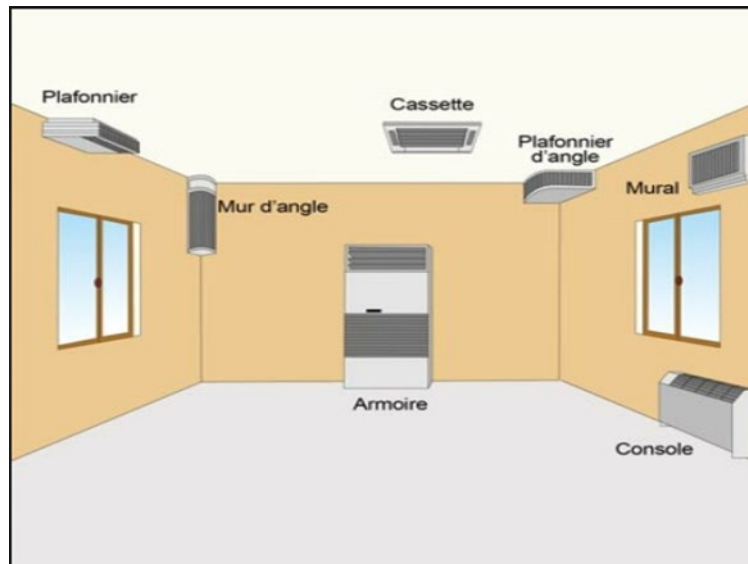


Figure 54. Système refroidissement d'air intérieur

- **Distribution de l'air** : l'air refroidi est distribué dans les environnements via les conduits et les ventilateurs.

### *III.13 Fonctions supplémentaires :*

chauffage : pour la fonction de chauffage, le cycle de réfrigération est inversé en utilisant une pompe à chaleur ou un système de chauffage séparé .

- **Régulation de l'humidité** : les systèmes de climatisation peuvent utiliser des déshumidificateurs pour éliminer l'excès d'humidité ou des humidificateurs pour ajouter de l'humidité à l'air sec.
- **Contrôle du système** : L'ensemble du système est contrôlé par un thermostat ou un système de contrôle qui surveille et régule la température souhaitée, l'humidité et d'autres paramètres pour garantir confort et efficacité énergétique.

### *III.14 Types de systèmes de climatisation :*

Les systèmes de climatisation peuvent être classés comme mono-split et multi-split, avec des différences significatives dans leur structure et leur utilité.

Dans le mono-split, une seule unité intérieure est connectée à une unité extérieure, adaptée pour refroidir ou chauffer une seule pièce. Cette unité intérieure peut être de différents types comme murale, plafond ou au sol.

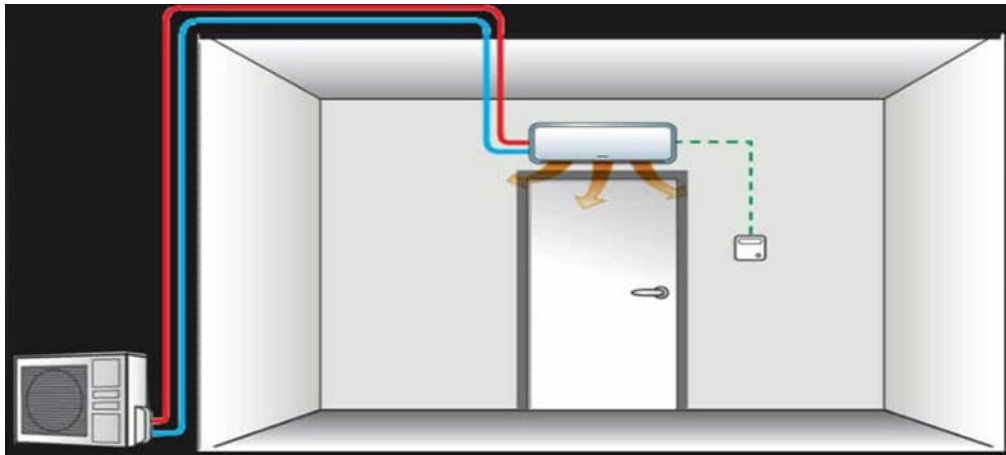


Figure 55. Climatisation mono split

Le système multi-split permet quant à lui de connecter plusieurs unités intérieures à une seule unité extérieure. Cette flexibilité permet de climatiser différentes pièces ou zones simultanément, chaque unité intérieure étant contrôlable indépendamment.

**Multisplit : 1 seul groupe extérieur + 2 à 5 unités intérieures**

Chaque unité intérieure dispose de sa télécommande et peut être réglée à une température différente

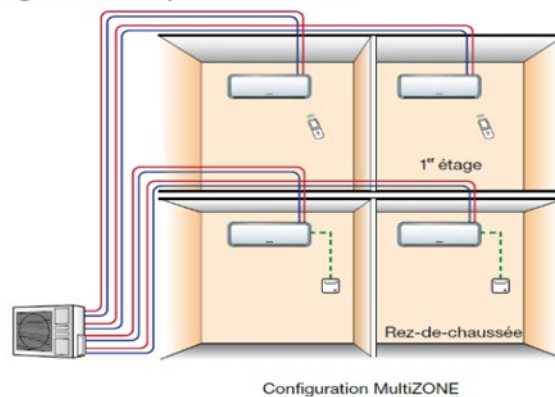


Illustration : HITACHI

Figure 56. Configuration multisplit

Le choix entre mono-split et multi-split dépend des besoins spécifiques de l'utilisateur : le premier est idéal pour les pièces individuelles, tandis que le second offre une solution plus adaptée pour climatiser différentes zones, garantissant un contrôle individuel.

**Comment choisir le système de climatisation ?**

Le choix du bon système de climatisation nécessite une évaluation attentive de plusieurs facteurs :

**1.dimensions de l'environnement :** la taille de l'environnement influence la puissance requise du système. Les environnements plus vastes nécessitent des systèmes plus puissants pour assurer une distribution uniforme de l'air conditionné .

**2.charge thermique :** calculer avec précision la charge thermique est essentiel pour déterminer la capacité de refroidissement ou de chauffage requise. Des facteurs tels que l'isolation thermique, l'exposition au soleil et le nombre de personnes présentes influent sur la charge thermique ;

**3.efficacité énergétique :** pour réduire les coûts énergétiques à long terme, il est essentiel de considérer l'efficacité énergétique du système. Vérifiez le coefficient de performance énergétique (COP) ou le coefficient de performance (COP) pour garantir une consommation énergétique optimale ;

**4.types de systèmes :** évaluer les différentes typologies de systèmes, comme les systèmes centralisés, autonomes ou les pompes à chaleur. Analysez les avantages et les inconvénients en fonction des besoins spécifiques de l'environnement ;

**5.entretien et assistance :** vérifiez le service après-vente et la disponibilité des pièces de rechange est essentiel pour garantir le bon fonctionnement à long terme. Assurez-vous que le fournisseur propose des services d'entretien adéquats ;

**6.budget :** établissez un budget complet, en tenant compte des coûts initiaux, opérationnels (comme l'énergie et l'entretien) et de la durée de vie du système.

### ***III.15 Les équipements de ventilation :***

Lors de travaux de rénovation énergétique, il est essentiel de prendre en compte la ventilation. En limitant la pénétration de l'air extérieur, une isolation efficace réduit le renouvellement d'air ambiant, causant une accumulation d'humidité et l'apparition de moisissure.

Pour remédier à cela, l'installation d'une VMC est recommandée. Vous trouverez deux principales options :

- **La VMC simple flux :** qui extrait l'air vicié de votre logement tout en introduisant de l'air frais par le biais d'entrées d'air sur les fenêtres.

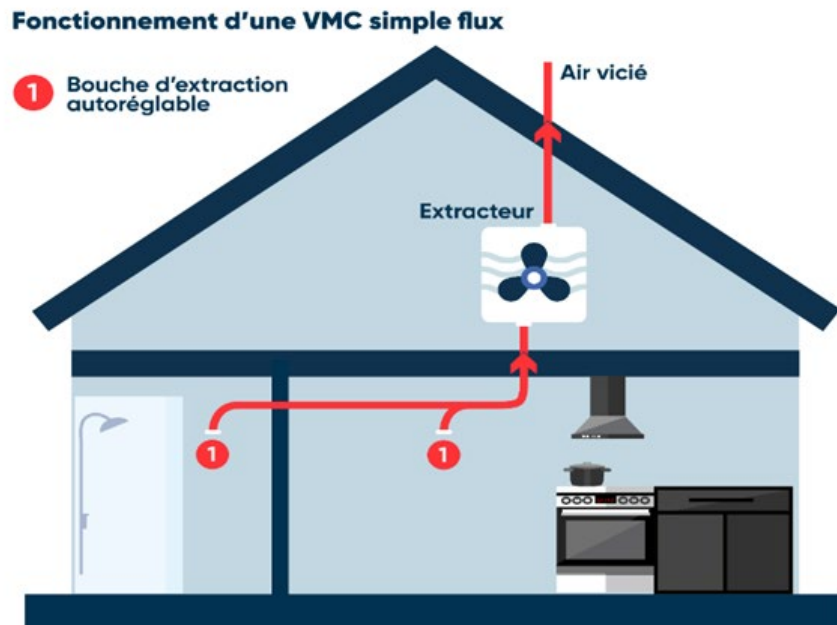


Figure 57. VMC simple flux

- **La VMC double** : flux qui préchauffe les flux d'air entrant en récupérant la chaleur de l'air sortant, ce qui permet de réaliser des économies d'énergie.

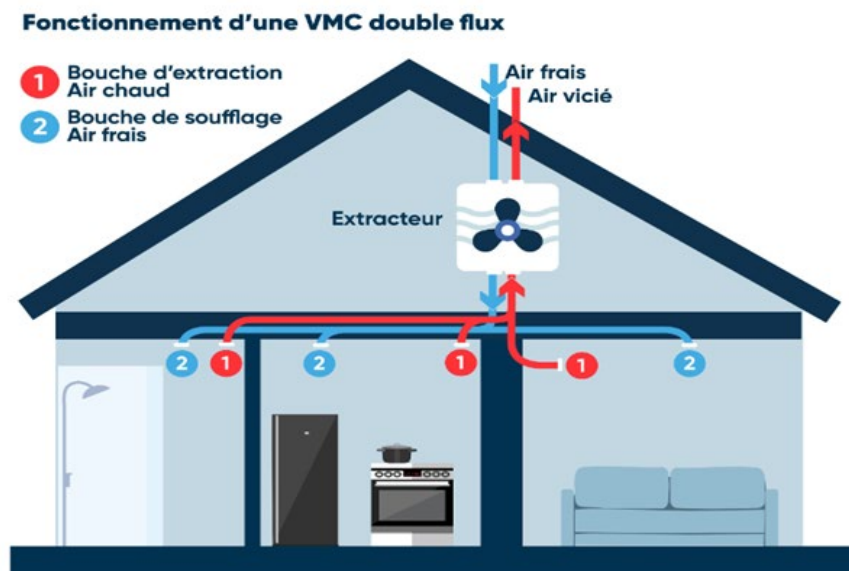


Figure 58. VMC DOUBLE FLUX

### **III.16 L'optimisation des éclairages :**

Des mesures simples au niveau de l'éclairage peuvent limiter cette dépense, tout en améliorant le confort visuel.

Remplacer les ampoules traditionnelles par des ampoules à LED. Elles consomment moins d'énergie pour produire la même quantité de lumière, ce qui se traduit par une réduction immédiate de la facture d'électricité. De plus, elles ont une durée de vie plus longue.

Pour aller plus loin, on installe des systèmes d'éclairage intelligents et des variateurs de lumière

- Les variateurs permettent d'ajuster l'intensité lumineuse en fonction de vos besoins, réduisant la consommation d'énergie lorsque la luminosité maximale n'est pas nécessaire.
- Les systèmes d'éclairage intelligents, quant à eux, permettent de contrôler l'éclairage à distance via une application, de programmer des horaires d'éclairage et d'ajuster les niveaux de luminosité en fonction de la lumière naturelle.

#### **➤ Utilisation d'énergies renouvelables**

Les travaux de rénovation énergétique peuvent également inclure l'installation de sources d'énergie renouvelable pour alimenter votre maison ou votre bâtiment de manière plus durable :

- **Panneaux solaires photovoltaïques** : ils convertissent la lumière du soleil en électricité pour alimenter vos appareils et vos systèmes électriques.
- **Chauffe-eau solaires** : ces systèmes utilisent l'énergie solaire pour chauffer l'eau sanitaire, réduisant ainsi la consommation d'électricité ou de gaz.

La rénovation énergétique globale d'un logement :

Le bien-être dans une maison dépend de plusieurs paramètres et surtout des différentes installations. Pour assurer le confort pendant toutes les saisons et éviter une dépense énergétique en perpétuelle croissance, on doit analyser les systèmes de rénovation énergétique globale du logement. Plusieurs travaux entrent dans le cadre d'une rénovation globale d'une maison. Ils concourent essentiellement à limiter le coût des factures et de garantir une bonne performance thermique.

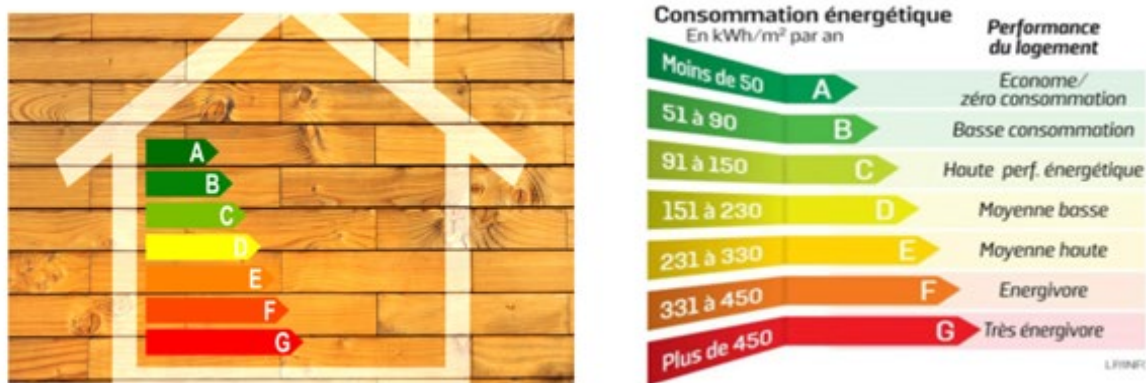


Figure 59. Classification des maisons selon leur bilan énergétique

**III.17 Conclusion :**

Une bonne connaissance de l'état actuel du parc immobilier existant, permet d'une meilleure évaluation pour une meilleure intervention qui assure les besoins des utilisateurs et aussi qu'une meilleure valorisation du contexte énergétique.

D'après l'étude que nous avons développée dans ce chapitre, nous concluons que ; pour réduire les besoins énergétiques dans les bâtiments scolaires, en même temps rendre plus confortable (assurer un niveau de confort thermique), nous pouvons jouer sur plusieurs paramètres du bâtiment lui-même ; son enveloppe : l'isolation par l'intérieur et l'extérieure, le choix des matériaux isolants le plus performants, types de vitrages, brises soleils, et l'amélioration des performances et du rendement des équipements (chaudières à condensation...). Une opération de réhabilitation est nécessaire pour sauvegarder ces bâtiments et un outil adéquate pour la l'amélioration de la question énergétique dans les bâtiments scolaires existants.

**Chapitre IV : Simulation numérique  
de la réhabilitation thermique d'un  
bâtiment tertiaire**

## **CHAPITRE IV : Simulation numérique de la réhabilitation thermique d'un bâtiment tertiaire**

### ***V.1 Présentation cas d'étude :***

Dans ce chapitre nous allons aborder la réhabilitation énergétique d'un bâtiment énergivore dont la construction remonte aux années quatre-vingt. Pour le choix du bâtiment tertiaire à réhabiliter, nous avons opté pour le Laboratoire de construction de transport et protection de l'environnement (LCTPE) construit dans les années quatre-vingt.

Le site étudié est situé au sein de la faculté des sciences et de la technologie (site 1500) à Mostaganem ; il est composé d'un laboratoire pédagogique destiné aux étudiants de génie civil et du laboratoire LCTPE (laboratoire de construction de transport et protection de l'environnement) et deux locaux à usage de bureau.

### ***V.2 Caractéristiques géométriques :***

Longueur totale :26.28 m

Largeur totale :13.65 m

Hauteur sous plafond :2.97 m



**Figure 60.** Siège du Laboratoire de construction de transport et protection de l'environnement (LCTPE)

- **Les murs en brique en double cloisons** : deux parois en brique creuse de 10 et 15 cm respectivement, séparés par une lame d'air de 5 cm



**Figure 61.** Façade sud du laboratoire (entrée principale)



**Figure 62.** Façade sud (enseleillé).

- Les fenêtres sont en simple vitrage et les cadres en bois



**Figure 63.** Vue de l'intérieur du laboratoire LCTPE



**Figure 64.** Disposition des fenêtres du laboratoire LCTPE



**Figure 65.** Vue intérieure du plancher haut du laboratoire.

-Les trois côtés du bâtiment (nord; sud et ouest) sont dégagés , la façade Est est mitoyenne avec un bloc de salle de cours (bloc E)

**Toiture :**

Le plancher haut est inaccessible, et composé d'un plancher en corps creux et d'une dalle de compression en béton armé, le tout surmonté d'une isolation en pax alumine.



**Figure 66.** Isolation thermique par l'extérieure avec la laine de verre

**V.3 Simulation numérique du comportement dynamique thermique du cas étudiée :**

**V.3.1 Présentation du logiciel COMSOL Multiphysiqs :**

Pour mener à bien la simulation numérique, nous avons utilisé COMSOL-Multiphysics qui est un logiciel de simulation numérique basé sur la méthode des éléments finis (Figure 80). C'est un outil qui offre un environnement interactif destiné à la modélisation et la simulation de nombreuses problématiques scientifiques et techniques. Plusieurs modules spécifiques et pré-conditionnées sont mis à la disposition des utilisateurs. Dans le présent travaille, nous avons opté pour le module PDE (Equations aux Dérivés Partielles), en insérant les différents termes de l'équation générale de transfert de chaleur donnée en équation (9) et celle de la conductivité thermique à partir de l'équation (14).

## **Chapitre IV : ..... ... Simulation numérique de la réhabilitation thermique**

---

La simulation sous COMSOL se déroule en plusieurs étapes distinctes ; La figure 73 montre une interface du logiciel indiquant le processus à suivre pour la résolution des problèmes de simulation thermique, à savoir :

- 1- Choix de la dimension l'espace de travail (2D-axisymétrique)
- 2- Définitions globales (Saisie des paramètres liées notamment à la géométrie et aux matériaux).
- 3- Géométrie (Tracé de la géométrie en utilisant les différents outils de dessin disponibles).
- 4- Matériaux (Introduction des propriétés Thermo-physiques des différents matériaux utilisés)
- 5- Affectation des matériaux aux domaines géométriques correspondants.
- 6- Introduction des coefficients à dérivées partielles en fixant la T comme variable de calcul.
  - 6-1- Introduction des conditions aux limites de température (affectés à chaque frontière).
  - 6-2- Introduction des conditions initiales de température (affectés à chaque domaine).
- 7- Maillage de la géométrie.
- 8- Détermination de l'intervalle temps et du pas de calcul.
- 9- Exploitation des résultats (graphique, image, tableur ou vidéo ...)

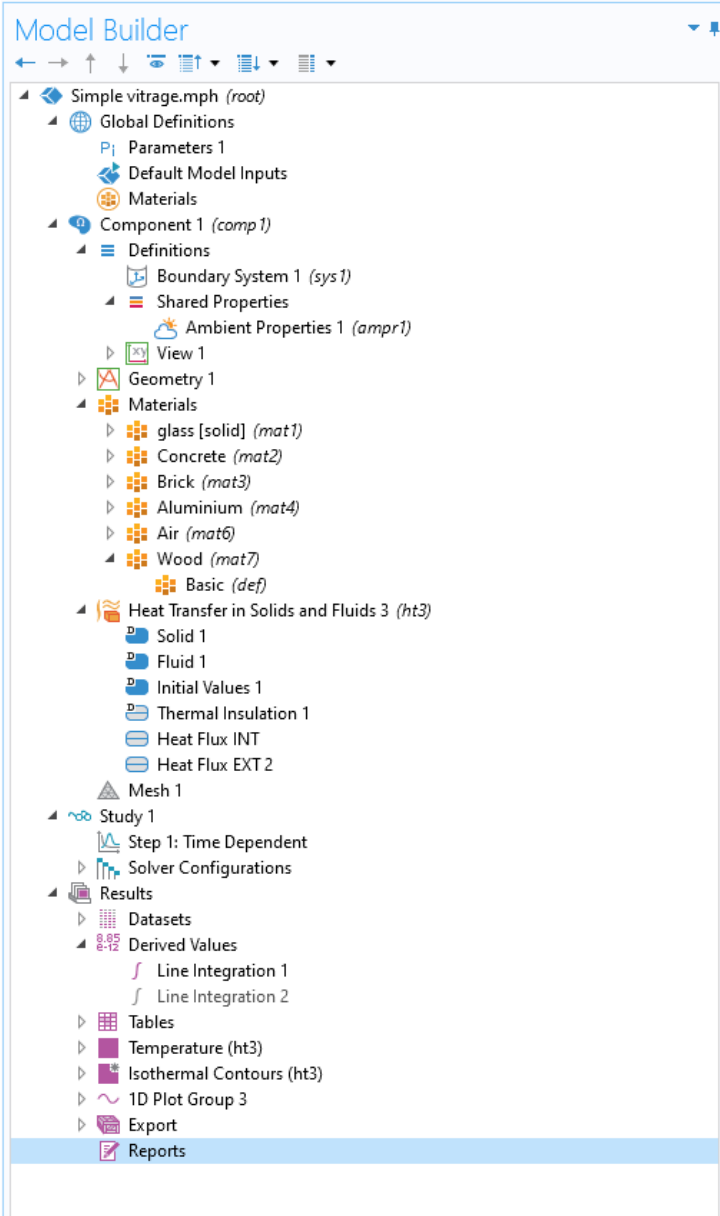
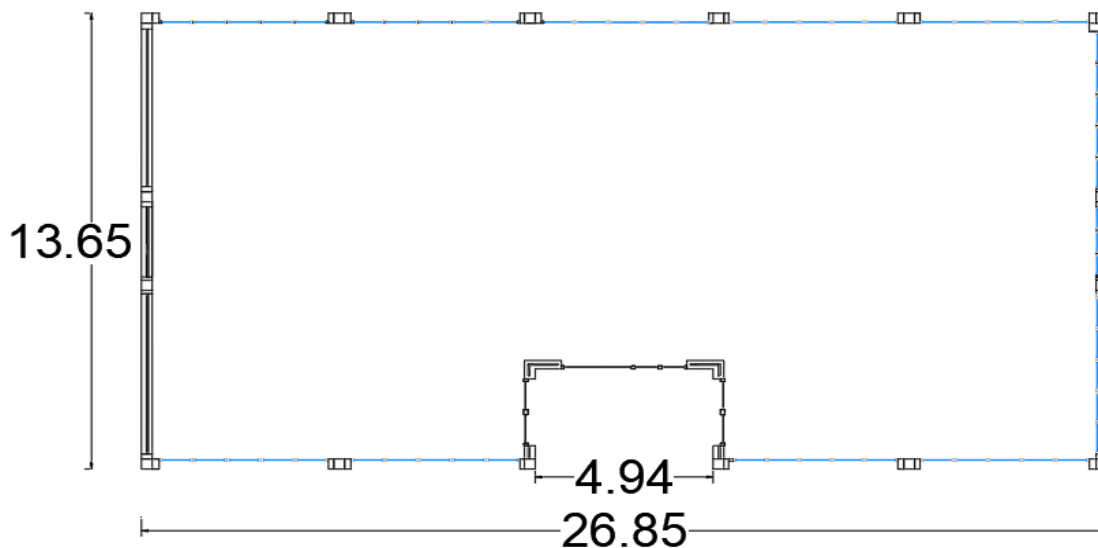


Figure 67. Interface de travail sous COMSOL et organigramme de la simulation

**V.3.2 Géométrie :**

Les figures 74 et 75 montrent les dimensions en plan et la disposition des différents éléments composants les parois verticales di bâtiment étudié (portes, fenêtres, murs, poteaux ....).

- La structure est de forme rectangulaire de 26,85 m de longueur et 13,65 m de largeur, avec une hauteur sous plafond de 2,97m.
- Les cloisons sont en brique double cloison avec un revêtement en ciment sur les faces intérieur et extérieurs.
- Aucune installation de chauffage ou de climatisation n'est présente.



**Figure 68.** Coupe en plan du bâtiment étudié (niveau fenêtres)

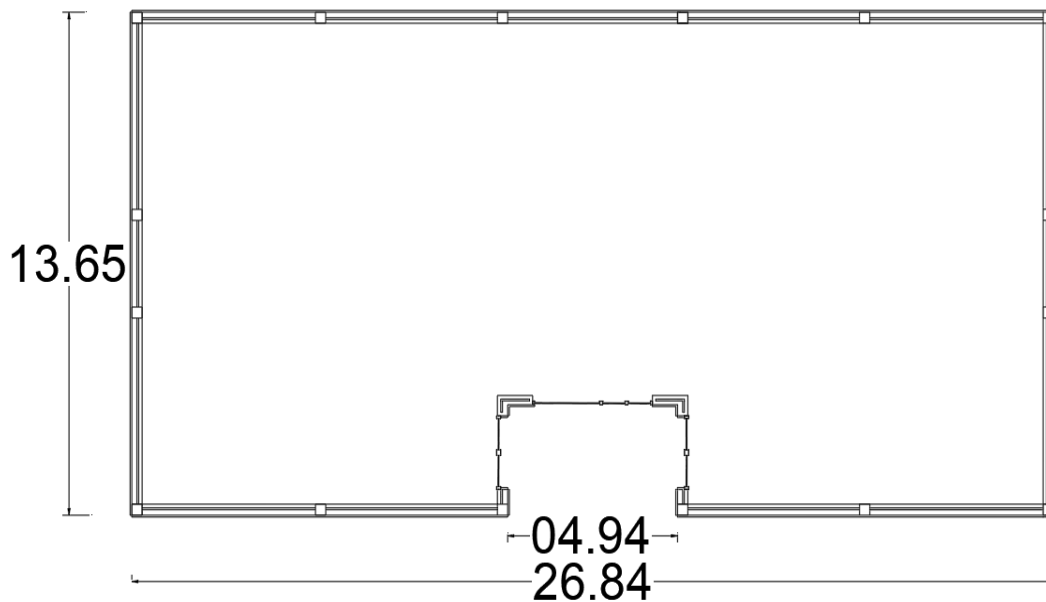


Figure 69. Coupe en plan du site étudié (niveau murs)

**V.3.3. Matériau employés :**

Afin de mener à bien la simulation numérique de la réhabilitation énergétique, nous présentons dans le tableau 6 Les différentes caractéristiques thermo-physiques de l'ensemble des matériaux utilisés.

Tableau 6. Caractéristiques thrm-physiques des matériaux utilisés.

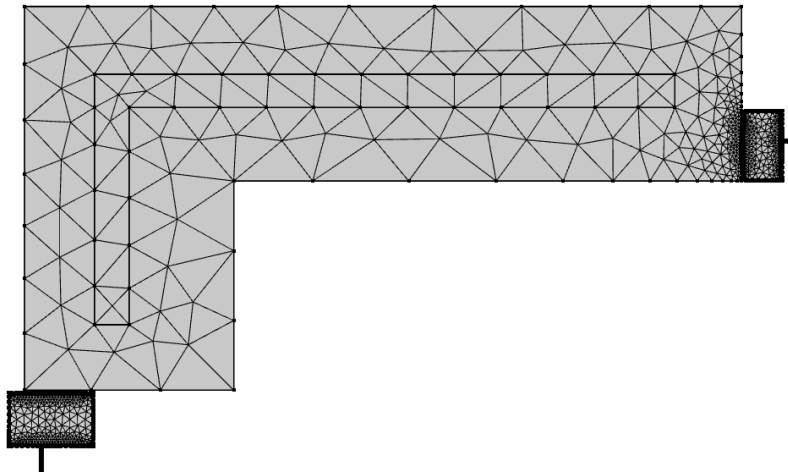
Matériau	Masse volumique KG /m <sup>3</sup>	Chaleur spécifique j/(kg.k)	Conductivité thermique watt /(M.K)
Béton armé	2300	880	1.8
Brique	2000	900	0.2559
Bois	500	1600	0.13
Aluminium	2800	880	160
Air	1.26	1010	0.026
Verre	2800	880	160
Gaz argon	1.7835	5.218	0.01772

---

Panneaux en laine de verre	73	850	0.030
-------------------------------	----	-----	-------

---

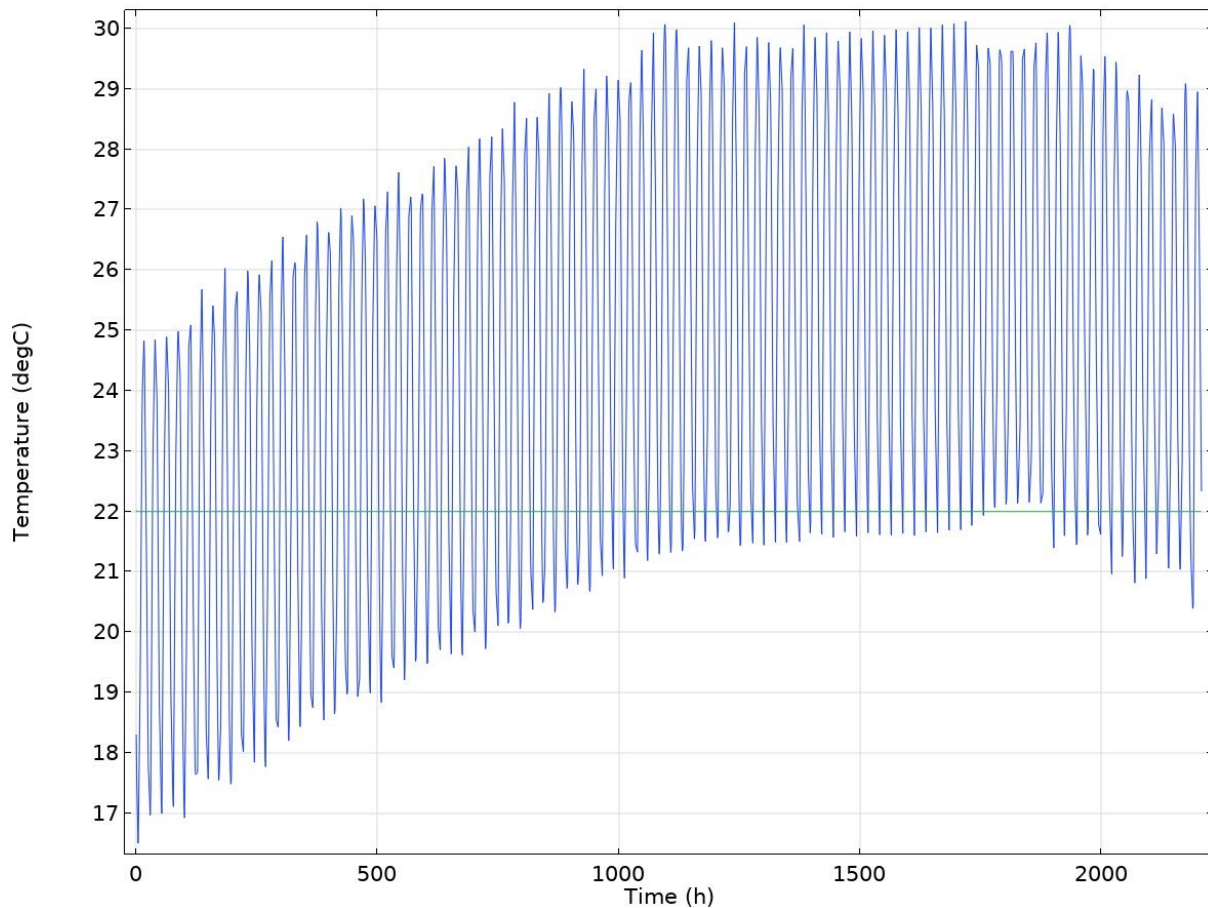
➤ **Maillage**



**Figure 70.** Maillage de la structure

Le maillage employé est un maillage triangulaire qui consiste en 47813 éléments avec une qualité moyenne de l'ordre de 0.6863 (Figure 76). Le maillage a été affiné au niveau des cavités et des surfaces vitrées afin que les résultats obtenus soient le plus précis possible. Le temps de résolution sur un PC quadri-coeur CPU 2,40 GHz est d'environ 1 minute et 28 secondes, ce qui est tout à fait acceptable.

➤ **Conditions au limites**



**Figure 71.** Conditions aux limites intérieur et extérieurs pour la température (du 1<sup>er</sup> Juin au 31 Aout 2021) (ASHRAE 2021)

### ➤ Conditions initiales

Afin d’atteindre l’équilibre énergétique aussi vite que possible dans la structure, la température initiale de calcul pour l’ensemble de la structure est fixée à 20°C afin de se rapprocher le plus possible de la moyenne journalière extérieure et celle de l’intérieure qui est fixée à 22°C.

### Résultats de la simulation :

#### ➤ Flux de chaleur

Les déperditions d’énergie ont été quantifiés via le logiciel COMSOL Mutiphysiques, Le flux de chaleur convectif entrant ou sortant depuis la surface intérieure des parois et fenêtres est déterminés pour l’ensemble de la géométrie pour les deux phases avant et après réhabilitation énergétique.

Le flux de chaleur à travers la surface extérieure donné ci-dessous comprend les effets de la conduction et de la convection.

$$q_e = \alpha_e (T^{eq} - T_{surf,e}) \quad (17)$$

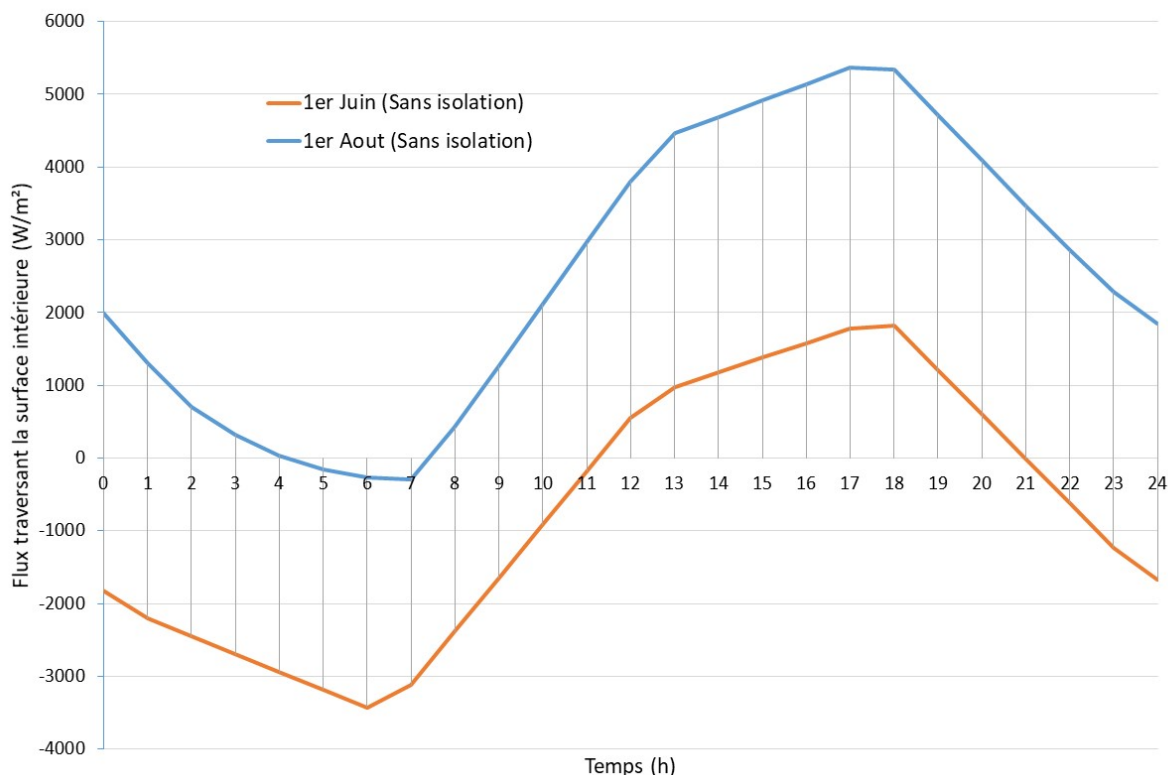
où  $\alpha_e$  est le coefficient de transfert de chaleur par convection de la surface extérieure,  $T^{eq}$  est la température extérieure équivalente et  $T_{surf,e}$  est la température de la surface extérieure. De même, le flux de chaleur à travers la surface interne de l'enveloppe du bâtiment  $q_{n,i}$  est donné par:

$$q_i = \alpha_i (T_i - T_{surf,i}) \quad (18)$$

Où  $\alpha_i$  est le coefficient de transfert de chaleur de la surface intérieure,  $T_i$  la température de l'air ambiant intérieur et  $T_{surf,i}$  la température de la surface intérieure.

La figure 78 représente la variation du flux thermique dans la structure *avant réhabilitation énergétique* pour les deux journées du 01 juin et 01 aout, respectivement. Etant donné que la journée du 1<sup>er</sup> Aout est la plus chaude de l'année, le flux traversant la structure est nettement plus important car la différence température entre l'air extérieur et la température ambiante intérieur est élevée ( $\Delta T = 8^\circ\text{C}$ ) pour la température maximale en journée). La différence moyenne de flux entre les deux journées est de 3312 W/m avec un pic de 3822 W/m enregistré entre 17h et 18h.

***Les déperditions totales pour la journée du 1<sup>er</sup> Aout est de 63394 W/m.***



**Figure 72.** Flux thermique traversant la paroi depuis l'intérieur (Avant réhabilitation)

La figure 79 montre la variation du flux thermique dans la structure *après réhabilitation énergétique* pour les deux journées du 01 juin et 01 aout, respectivement. La journée du 1<sup>er</sup> Aout étant la plus chaude, le flux traversant la structure est également plus important car la différence température entre l'air extérieur et la température ambiante intérieur est élevée ( $\Delta T = 8^{\circ}\text{C}$  pour la température maximale en journée). La différence moyenne de flux entre les deux journées est de 282 W/m avec un pic d'écart de 326 W/m enregistré entre 17h et 18h, *soit une réduction de plus de 90 % des déperditions énergétique.*

**Récapitulatif :**

- Les déperditions totales (après réhabilitation) pour la journée du 1<sup>er</sup> Aout est de **4433 W/m.**
- Les déperditions totales (avant réhabilitation) pour la journée du 1<sup>er</sup> Aout est de **63394 W/m.**
- Le gain énergétique totale sur la journée du 1<sup>er</sup> Aout est de 59 KW/m soit près 93 %.

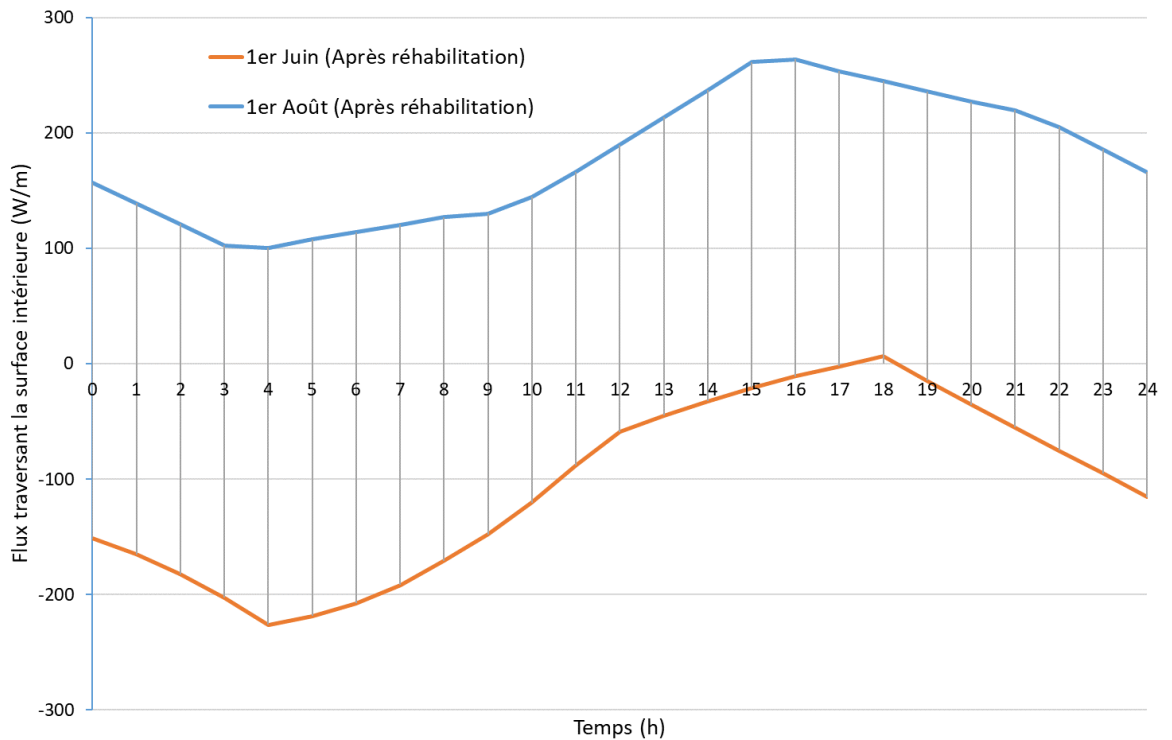
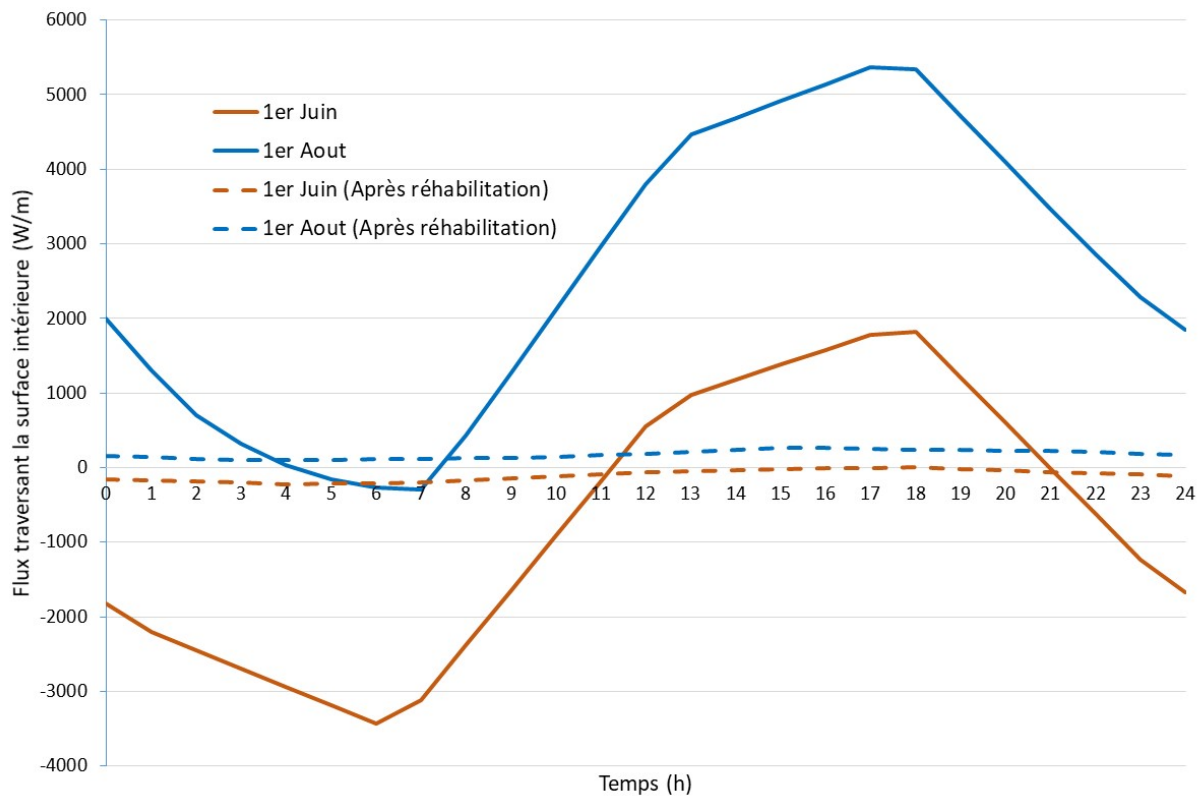


Figure 73. Flux thermique traversant la paroi depuis l'intérieur (Après réhabilitation)

La figure 80 montre les variations du flux de chaleur avant et après réhabilitation énergétique de la structure pour les journées du 1<sup>er</sup> Juin et 1<sup>er</sup> Août 2021. Les courbes discontinues (après réhabilitation) présentent une tendance nettement moins sinueuse que les courbes continues (avant réhabilitations), les valeurs de flux sont également très éparpillées. Nous en concluons que la réhabilitation énergétique permet également de garder un niveau de déperditions d'énergie nettement plus bas et constant dans le temps comparé au flux traversant la structure non isolée.



**Figure 74.** Comparatif des flux thermique traversant la paroi depuis l'intérieur (W/m) (Avant et Après réhabilitation)

### Performance thermiques des portes et fenêtres :

Les portes existantes dans la structure étudiée sont en aluminium simple vitrage et les fenêtres sont du type standard en bois léger avec un vitrage simple de 3 mm, elles sont remplacés dans la simulation par des fenêtres à haute performance avec un cadre en aluminium et un double vitrage de 4 mm d'épaisseur pour chaque vitre et un vide de 16 mm d'épaisseur rempli d'argon comme gaz inerte à très faible conductivité thermique.

La figure 86 montre la déperdition énergétique à travers une fenêtre simple vitrage (avant réhabilitation) et une autre à haute performance en double vitrage durant la journée du 1<sup>er</sup> Aout.

Il est aisément constaté que le gain d'énergie est très appréciable notamment pour les périodes où les températures externes sont les plus élevés (entre 17h et 18h). En effet, le flux enregistré en ce moment de la journée est de 200 W/m et 35 W/m pour les configurations avant et après réhabilitation, respectivement.

Le gain énergétique en ce point précis est de 82,5 %. Pour l'ensemble de la journée du 1<sup>er</sup> Aout 2021, Le gain en flux thermique est d'environ 80,5 %.

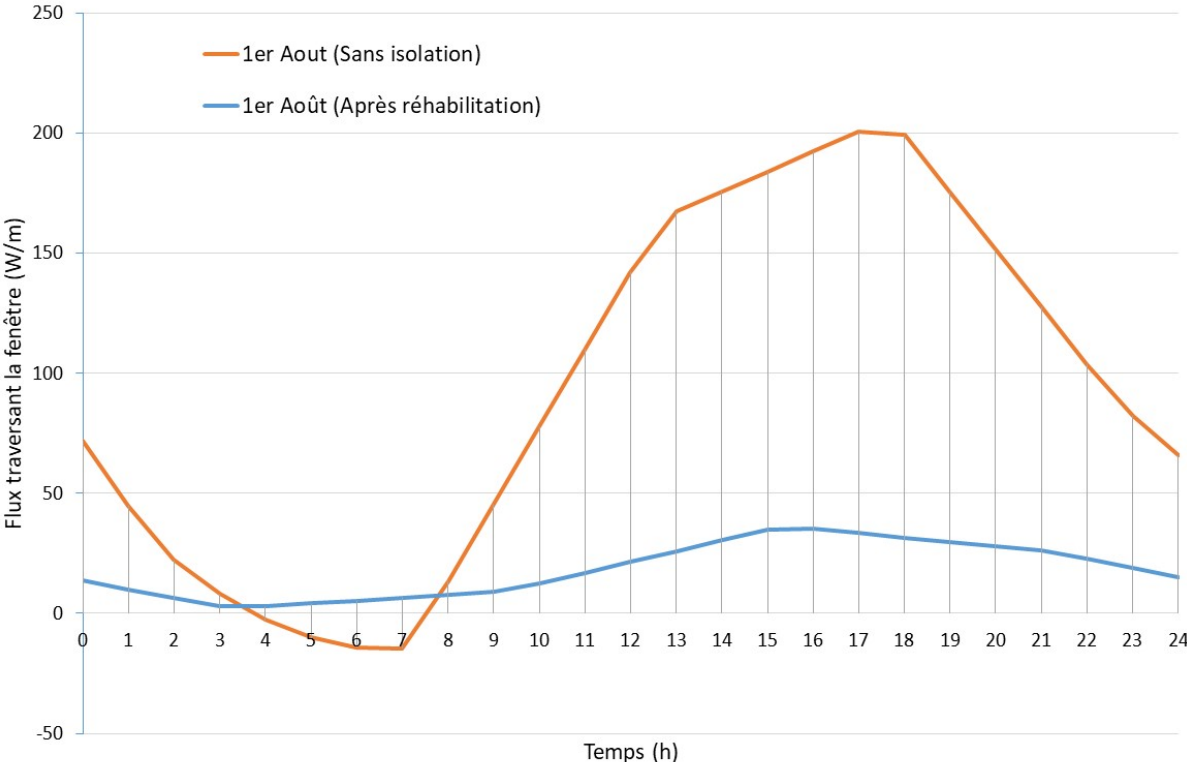


Figure 75. Flux thermique traversant une fenêtre depuis l'intérieur (W/m) (Simple vitrage et double vitrage)

### **Conclusion générale :**

La simulation numérique de la réhabilitation énergétique d'un bâtiment tertiaire offre de nombreux avantages. Elle permet d'évaluer différentes solutions techniques avant leur mise en œuvre, d'optimiser les coûts et de maximiser les gains énergétiques. En utilisant des outils de simulation, les ingénieurs peuvent modéliser le comportement thermique du bâtiment, analyser les flux énergétiques et tester l'efficacité de diverses stratégies de rénovation (comme l'isolation, le remplacement des systèmes de chauffage, et l'intégration des énergies renouvelables). De plus, ces simulations permettent de prévoir les économies d'énergie potentielles et de réduire les risques associés aux travaux de réhabilitation.

Lors de ce travail, nous nous sommes intéressés à la réhabilitation énergétique d'un bâtiment tertiaire situé à la faculté des sciences et de la technologie de l'université de Mostaganem. Il abrite le laboratoire de génie civil LCTPE et un laboratoire pédagogique séparés par des bureaux.

La simulation avant et après réhabilitation énergétique nous a mené vers les conclusions suivantes :

- L'utilisation des panneaux en laine de verre comme isolation par l'extérieur et les fenêtres en double vitrage nous a permis d'économiser jusqu'à 93 % du flux thermique entrant ou sortant de la structure.
- Le remplacement des fenêtres simple vitrage en bois léger vers des fenetre en double vitrage en aluminium permet de réduire les déperditions de plus de 80 %.

En conclusion, la simulation numérique est un outil indispensable pour planifier et mettre en œuvre des projets de réhabilitation énergétique de manière efficace et rentable.

### **Recommandations :**

La présente simulation se limite à la réhabilitation thermique des murs extérieurs et fenêtres, il serait utile d'isoler la toiture inaccessible ainsi que le plancher bas de la structure.

### **Références bibliographiques**

- ABDERAHMEN. (2020). CONVERSION THERMIQUE DE L'ENERGIE SOLAIRE ET APPLICATION POUR LA PRODUCTION D'EAU CHAUDE SANITAIRE. ANNABA.
- ALKATOT. (2015). Cancer de la vulve.
- Alkatout, I., Schubert, M., Garbrecht, N., Weigel, MT, Jonat, W., Mundhenke, C. et Günther, V. (2015). Cancer de la vulve : épidémiologie, présentation clinique et options de prise en charge. Revue internationale sur la santé des femmes , 305-313. (2015).
- FRANCE, D. (2001). Mesure des coefficients de transfert thermique par convection forcée en mini-canaux. Mécanique & industrie. TOULOUSE.
- G, B. (s.d.). rénovation énergétique des logements sur la consommation d'énergie. LA REVUE DE L'ENERGIE.
- GIOVANNINI. (2012). Giovannini, A., & Bédard, B. (2012). Transfert de chaleur. Cépaduès.
- GIOVANNINI. (20212). Giovannini, A., & Bédard, B. (2012). Transfert de chaleur. Cépaduès. BENOIT.
- LETIZIA. (2017). Modèles microscopiques pour la loi de Fourier (Doctoral dissertation, . PARIS: COMUE.
- MATHERON. (2023). la consommation mesurée par les compteurs connectés.
- MIRA. (2017). RAHMANI, R. La gouvernance du programme algérien de mise à niveau: quels acteurs, quels rôles, et quelles contraintes de mise à niveau Une approche comparative Algérie. BEJAIA.
- Modélisation et caractérisation expérimentale d'un évaporateur à mini-canaux de climatisation automobile fonctionnant au CO2 . (2007).
- Modélisation et caractérisation expérimentale d'un évaporateur à mini-canaux de climatisation automobile fonctionnant au CO2 . (2007). NANCY.
- P, G. (2012). . (2012). Sarking: When to use it. Building Connection, . Summer 2012), 50-51.
- P, V. (1997). Critère d'aptitude à l'emboutissage de tôles minces orthotropes. Matériaux & Techniques, 85(3-4), 39-44.
- RECIQUI. (2017). Etude prospective de la récupération d'énergie en Algérie . SBA.