REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR
ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
Université Mohammed Khider - Biskra -

Faculté d'architecture, Génie Civil et Hydraulique`

Département de Génie Civil et hydraulique

POLYCOPIE

Thermique du bâtiment

Destiné aux étudiants de 1ère année Master : Matériaux en génie civil et structures

ZEGHICHI Leila

Année 2025 -2026

Avant-propos

Le présent polycopié est constitué de cours du premier semestre du programme LMD, destiné aux étudiants de la première année Master Matériaux en génie civil et structures au sein du département de Génie Civil & Hydraulique de l'Université Mohammed Khider - Biskra -

Dans un monde où la consommation d'énergie et la préservation de l'environnement sont des préoccupations majeures, la thermique du bâtiment présente un mot clé. Que ce soit pour des projets de construction neuve ou de rénovation, optimiser les performances thermiques des bâtiments est nécessaire pour assurer le confort des individus tout en minimisant les coûts énergétiques

Ce document présente un cours sur la thermique du bâtiment. Il introduit les différents modes de transfert de chaleur, le confort …. Dont le but est de familiariser les étudiants avec de nouveaux termes *:* consommation d'énergie et la préservation de l'environnement en mettant l'accent sur les matériaux et techniques d'isolation thermique. . Le cours est enrichi par plusieurs exemples et exercices.

Le polycopié se limite à cinq chapitres, dans le premier chapitre on présente la thermique du béton et à quoi elle sert, le second chapitre traite les transferts de chaleur, le troisième expose le confort thermique. Dans le quatrième chapitre on s'intéresse aux déperditions thermiques dans les locaux non isolés en précisant leurs types. Le dernier chapitre est consacré à l'isolation thermique en donnant des exemples sur les matériaux isolants et performants.

Enfin le document est clôturé par une liste de références servant à la rédaction de ce polycopié

Sommaire:

1.1 Introduction 1

1.2. Définition de La thermique du bâtiment 3

1.2.1. Les facteurs environnementaux : 3

1.2.2. Les facteurs fonctionnels :..... 3

1.2.3. Les facteurs liés à la nature des matériaux 3

1.3. A quoi sert l'énergétique du bâtiment ? 4

1.3.1. Le bâtiment est un gros consommateur d'énergie 4

1.3.2. Le bâtiment devrait être confortable 4

1.3.3. La consommation varie suivant la conception 5

1.4. Applications de l'énergétique du bâtiment 7

1.5. Définitions 7

1.5.2. Quantité de chaleur 7

1.5.3. Unités de chaleur 7

1.6. Exercices : 8

2.1. Transfert de chaleur 9

2.2. Flux de chaleur 10

2.3. Echanges thermiques 10

2.4 Transmission par conduction : 11

2.4.1. Conductivité thermique : 12

2.4.3. Régime permanent: 13

2.4.4. Analogie électrique 14

2.4.5. Paroi composite à faces parallèles: (Paroi multicouches) 16

2.4.6. Résistance thermique d'un mur composite : (association en parallèle)..... 16

2.6. Transmission par Convection : 17

2.7. Transmission par rayonnement 19

2.8. Transfert de chaleur dans une maison 19

2.9 Exercices..... 20

3.1. Les besoins de l'occupant..... 24

3.2. Définition du confort 24

3.3. Les paramètre du confort thermique 24

3. 3.1. Les facteurs liés à l'individu :..... 24

3.3.2. Les facteurs liés à l'environnement : 25

3.4 .Les relations confort - facteurs..... 26

3.4.1. Confort - température 26
3.4.2 Confort - humidité 27
3.4.3 Confort- activité 28
3.5. L'inconfort thermique : 28
***3*.6. Comment éviter l'inconfort thermique ?** 30
4.1. Définition : 33
4.2. Localisation des déperditions 33
4.2 .1* le toit *: 34
4.2.2 Les murs : 34
4.2.3 les systèmes d'aération : 34
4.2.4 les fenêtres : 34
4.2.5 Les ponts thermiques :. 34
4.2.6 Les planchers bas : 34
4.3. L'importance de combattre les déperditions thermiques : 35
4.4. Calcul des déperditions thermiques 35
4.4.1. Déperditions des parois 36
4.4.2. : Déperditions linéiques (ponts thermiques) : 37
4 .4.3. Déperditions volumiques : 38
4.5. Bases de calcul : 39
4.6. Exercices : 41
5.1. Introduction 43
5.2 L'intérêt de l'isolation thermique 44
5.3. Les Matériaux isolants : 46
5. 3.1. Qualité des isolants thermiques 46
5.4. Optimisation de l'isolation 47
5.4 .1. Optimisation de la conductivité 47
5.4.2. Optimisation de l'épaisseur 47
5.4.3. Optimisation de la surface d'échange 47
5.5. Classification des matériels isolants : 47
5.5.1 Produits minéraux 47
5.5.2 produits naturels 49
5.5.3. produits synthétiques 50
- Références 52

Chapitre 1 : Généralités

1.1 Introduction

Le secteur du bâtiment est parmi les secteurs économiques les plus gros consommateurs en énergie au niveau mondial, vu la croissance démographique, la création de nouvelles villes et l'utilisation soutenue de systèmes de climatisation et de chauffage que connaît le monde. A l'échelle planétaire, le secteur du bâtiment est responsable d'environ 30 à 40% de la consommation annuelle mondiale de l'énergie et de près de 30% de l'ensemble des émissions de gaz CO2 à effet de serre; il contribue donc dans une large mesure au changement climatique.

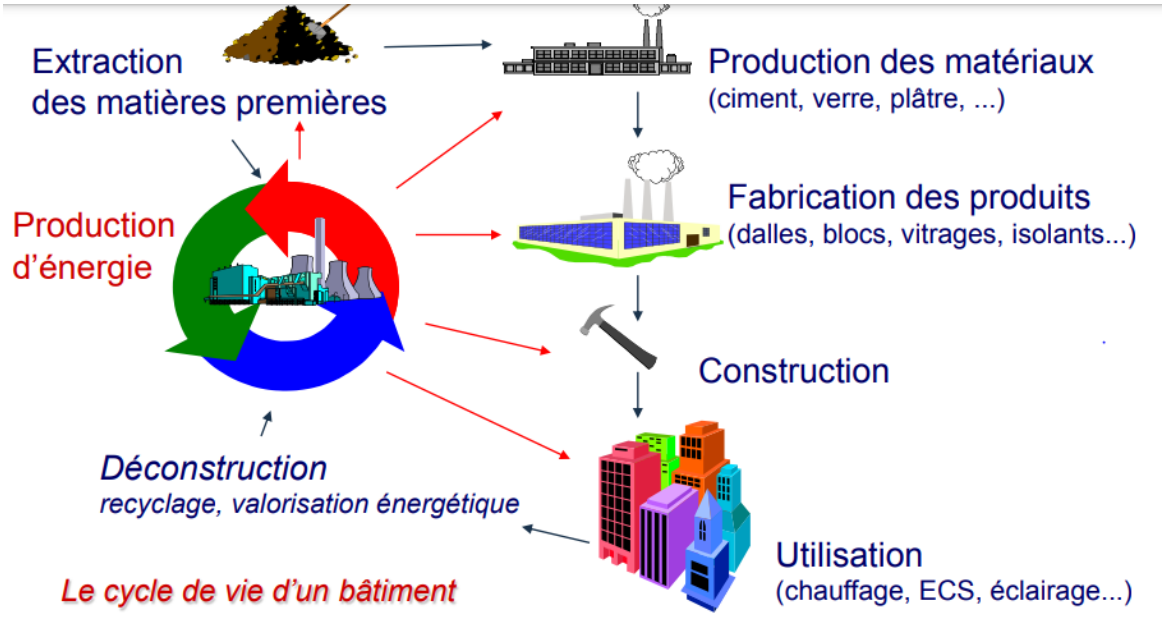


Figure 1: Consommation d'énergie dans le secteur du bâtiment

La consommation d'énergie dans le monde par les équipements de CVC (chauffage, ventilation et climatisation) dans les bâtiments varie de 16 à 50% de la consommation totale d'énergie.

L'habitat en Algérie se situe à la D (voir figure 2), en consommant plus que 151 kWh/an pour le chauffage, climatisation, eau chaude sanitaire et éclairage.

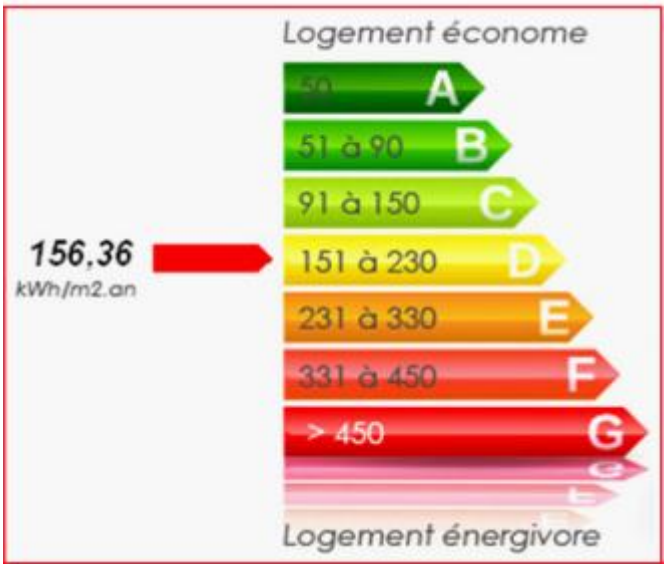


Figure 2 : label énergétique européen

En Algérie, la plupart des logements construits sont relativement non isolés, ce qui signifie que ces bâtiments ont de fortes déperditions thermiques et de fait consomment beaucoup plus d'énergie, et l'efficacité énergétique[1] n'est toujours pas appliquée dans la réalisation des bâtiments.

De plus, les bâtiments sont chauffés grâce à des énergies fossiles, donc fortement pourvoyeurs de gaz à effet de serre responsable en partie des changements climatiques. L'élévation globale des températures et la forte consommation énergétique nécessitent l'élaboration des concepts à forte efficacité énergétique qui seront appliqués aux bâtiments tels que L'isolation thermique, la diversification énergétique qui vise essentiellement une rapide intégration des énergies renouvelables (solaire photovoltaïque et thermique, éolienne, géothermique, biomasse).

Sans mesures immédiates, des milliers de nouveaux bâtiments seront construits sans aucune considération pour l'efficacité énergétique[1] et des millions de bâtiments existants consommant plus d'énergie que nécessaire seront toujours présents en 2050.

1 : En physique, « l'efficacité énergétique » désigne le rapport entre l'énergie utile produite par un système et l'énergie totale consommée pour le faire fonctionner.

Figure 3:énergies renouvelables

Les différentes parties d'un bâtiment sont soumises aux échanges de chaleur, entre elles en interne du bâtiment, ou entre l'intérieur et l'extérieur du bâtiment. La connaissance et la maîtrise de ces transferts thermiques permet une gestion de la facture énergétique du bâtiment ainsi que de son impact écologique.

1.2. Définition de La thermique du bâtiment

La thermique du bâtiment est l'ensemble des sciences et techniques 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.

La thermique du bâtiment décrit les échanges thermiques qui se réalisent entre un bâtiment et son environnement. Cette analyse va reposer sur toute une série de facteurs qui sont :

1.2.1. Les facteurs environnementaux : l'emplacement géographique d'un bâtiment (longitude, latitude, altitude) et les données climatiques afférentes, l'implantation générale du bâtiment ainsi que la nature du sol.

1.2.2. Les facteurs fonctionnels : deux bâtiments ne sont pas identiques par leur fonction, la chaleur à délivrer, l'eau à chauffer, l'humidité à évacuer, l'éclairage varient d'une affectation à l'autre.

1.2.3. Les facteurs liés à la nature des matériaux employés dans la construction du bâtiment : les parois extérieures, murs, planchers et toitures sont considérés comme des

surfaces d'échange thermique que l'on doit considérer relativement à leur orientation, leur dimension physiques, les matériaux de construction employés considérés dans leur épaisseur et leurs propriétés thermiques.

1.3. A quoi sert l'énergétique du bâtiment ?

1.3.1. Le bâtiment est un gros consommateur d'énergie

Dans les pays industrialisés, les bâtiments consomment une partie importante de l'énergie

Utilisée par la société et, en conséquence, ils sont source d'une partie non négligeable de la Pollution. Cette énergie est utilisée pour de nombreux usages, notamment:

- le chauffage et/ou le refroidissement, pour assurer un climat intérieur confortable
- la circulation de fluides tels que l'air (ventilation), l'eau (eau chaude, chauffage)
- les transports (ascenseurs)
- l'éclairage
- les communications (téléphone, radio, télévision)
- la production de biens (fabriques, cuisines, couture, etc...)

Dans les climats tempérés et froids, la plus grande part de l'énergie utilisée par un bâtiment

Sert au chauffage. Le flux de chaleur généré dans le système de chauffage aboutit inévitablement à l'extérieur par différentes voies plus ou moins directes.

Dans les climats plus chauds, il peut être nécessaire et en tous cas confortable d'abaisser la Température intérieure des bâtiments. Ce refroidissement peut aussi être un grand consommateur d'énergie.

1.3.2. Le bâtiment devrait être confortable

Un bâtiment devrait assurer, sans aucune consommation d'énergie, un confort au moins équivalent à celui régnant à l'extérieur.

S'il est bien conçu et construit, il peut fournir un confort nettement supérieur (courbe A de la Figure 4). Un tel bâtiment ne surchauffe pas ou peu en été et profite des gains solaires pendant les périodes froides, pour raccourcir la saison de chauffage et diminuer ainsi la facture de l'énergie.

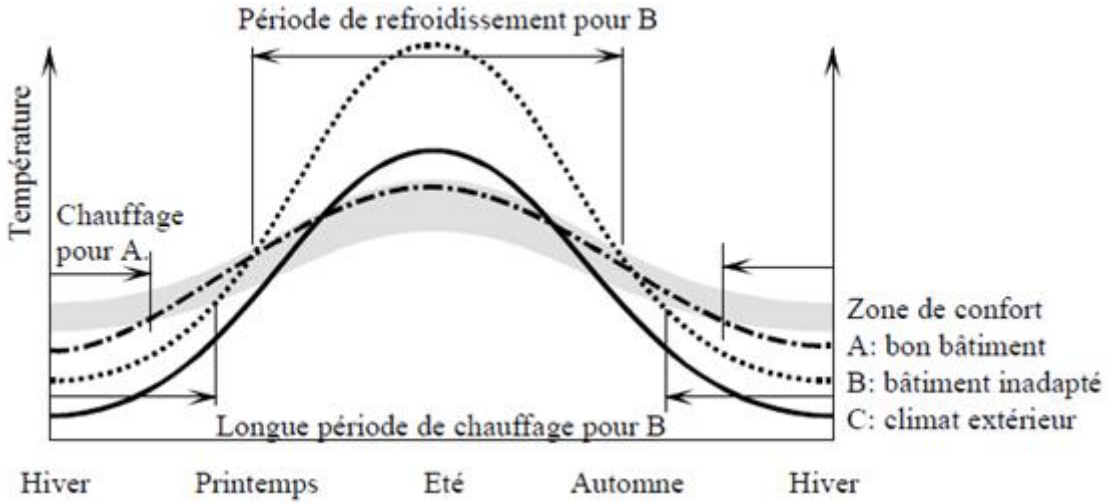


Figure 4 : évolution des températures dans les bâtiments au cours de l'année

Un bâtiment inadapté à son climat, (un exemple typique est un hôtel d'une grande chaîne Internationale quelconque) a tendance à surchauffer en saison chaude et à être glacial en Saison froide. Ces bâtiments consomment de grandes quantités d'énergie pour assurer un Confort acceptable.

1.3.3. La consommation varie suivant la conception

Un indice souvent utilisé pour comparer la consommation d'énergie du bâtiment est l'Indice de Dépense d'Énergie, ou IDE. On obtient cet indice en divisant la consommation annuelle D'énergie totale (de tous les agents énergétiques) exprimée en MJ par la surface brute de lancher chauffé (murs inclus). La norme SIA 180/4 donne le mode de calcul exact.

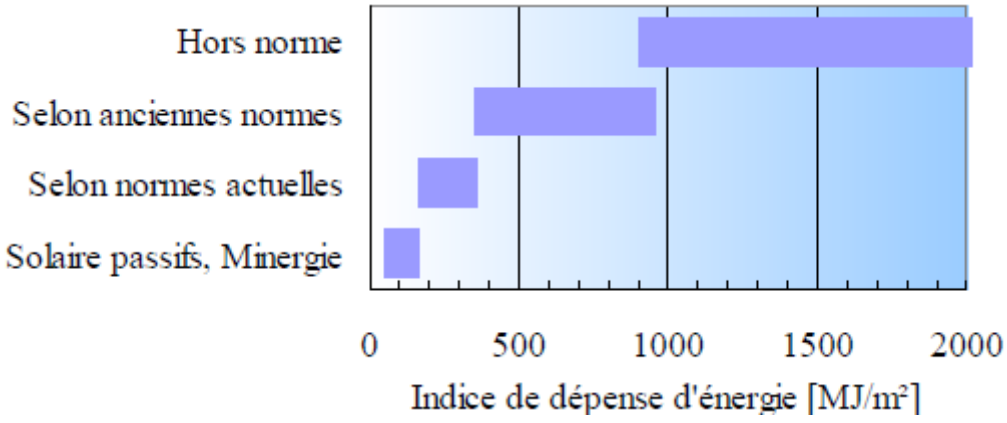


Figure 5: Gammes d'indices de dépense d'énergie de bâtiments.

La Figure 5 montre les gammes d'indices de dépense d'énergie de bâtiments suisses. On notera la large dispersion des valeurs, allant de presque zéro à plusieurs milliers de mégajoule par mètre carré pour certains bâtiments.

La consommation annuelle d'un bâtiment résidentiel moyen suisse est d'environ 700 MJ par Mètre carré de plancher chauffé.

Les bâtiments bien isolés, construits selon les nouvelles normes, présentent une consommation annuelle moyenne réduite à moins de la moitié, soit 325 MJ/m²

Les bâtiments solaires existants, non seulement bien isolés mais encore construits pour utiliser au mieux les gains solaires passifs, présentent une consommation annuelle de moins de 160 MJ/m². De tels bâtiments existent, sont habités et trouvés très confortables.

Un autre indice est utilisé : L'intensité d'utilisation d'énergie (IUE) mesuré en tant qu'énergie consommée par unité de surface , il peut indiquer la consommation d'énergie mesurée d'un bâtiment existant et comparer la performance énergétique de bâtiments similaires

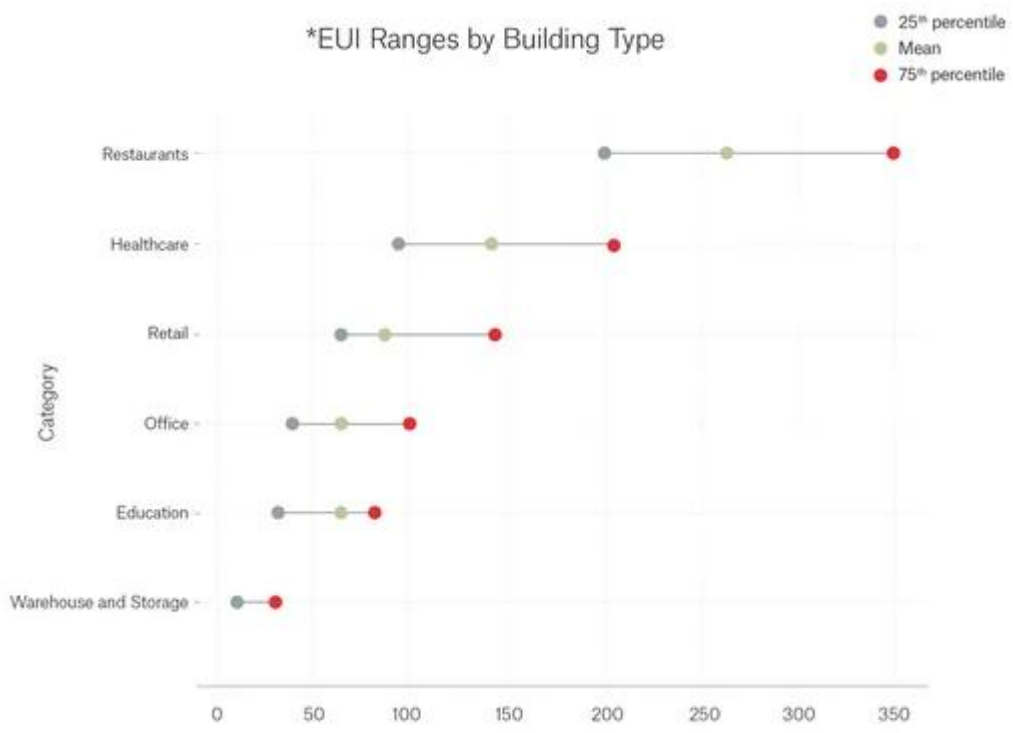


Figure 6 : Statistiques sur les fourchettes de l'IUE aux états unis

1.4. Applications de l'énergétique du bâtiment

Pour limiter la consommation d'énergie à des valeurs raisonnables, il est nécessaire de savoir où agir. Il faut donc pouvoir prédire les flux d'énergie dans le bâtiment, afin d'agir là où les mesures d'économie d'énergie seront les plus efficaces et les mieux à même d'offrir un confort élevé.

La connaissance des flux d'énergie au travers d'un bâtiment est nécessaire à la prise de décisions ou à la planification de travaux, notamment pour les tâches suivantes:

- adopter, parmi plusieurs stratégies possibles lors de rénovation ou de construction d'ensemble d'immeubles, la plus avantageuse du point de vue de l'environnement et de la politique énergétique.

- dimensionner correctement les installations énergétiques, en calculant la puissance de

Pointe minimum nécessaire.

- prévoir la consommation annuelle et la minimiser en choisissant la variante la plus économique globalement, tout en tenant compte du confort et des contraintes architecturales.

1.5. Définitions

1.5.1. Chaleur et température

La chaleur est une énergie crée par l'agitation des particules d'un corps.

La température représente l'état d'échauffement d'un corps.

La température peut s'exprimer en degré Celsius « °C » ou en Kelvin « K ». T(°C) = T(K) – 273 0 °K représente la température la plus basse possible, on l'appelle le zéro absolu.

A cette température il n'y a plus d'agitation particulaire.

1.5.2. Quantité de chaleur

La quantité de chaleur est l'énergie calorifique échangée ou contenue par un corps. Elle est notée Q . Son unité est le joule «J».

Pour élever la température d'un corps de masse M de T1 à T2, Il faut une quantité de chaleur :

$Q=M.C\,p.(T\,2-T1)$

Cp est la chaleur massique du corps.

A noter que si le corps refroidit de T2 à T1, il restituera la même quantité de chaleur Q qui sera comptée avec un signe moins du point de vue du corps considéré.

1.5.3. Unités de chaleur

En physique, la quantité de chaleur est exprimée dans les mêmes unités que l'énergie et le travail, à savoir en joules (J).

On utilise également la calorie (Cal), définie comme la quantité de chaleur nécessaire pour élever la température de 1 g d'eau de 14,5 °C à 15,5 °C sous une pression de 1 ATM.

On a : 4,1855 J = 1 Cal

1.6. Exercices :

Exercice 1 :

La température d'un corps est 20 °c quelle sera sa température en °K et en °F°

. Exercice 2 :

Quelle est la quantité de chaleur équivalente à 8.3 KJ ?

Exprimer 1Kcal /heure en Watts ?

. Exercice 3 :

Déterminer la chaleur massique d'un corps de masse 10Kg , si pour élever sa température de 10°C , il faut une quantité de chaleur de 100 Kcal .?

CHAPITRE 2 :
LES TRANSFERTS THEMIQUES

2.1. Transfert de chaleur

On appelle transferts de chaleur, les processus par lesquels l'énergie est échangée sous forme de chaleur entre des corps ou des milieux à des températures différentes T1 et T2.

2.2. Flux de chaleur

Le Flux de chaleur est la puissance thermique par unité de surface. Il est noté **Φ** il s'exprime en W/m2 .

Comme la chaleur elle même, le flux va du CHAUD vers le FROID.

Le flux engendré dans le transfert est proportionnel à la différence de température T1 - T2 et à la section de passage S du flux:

$$\Phi = h\ S\ (T1 - T2)$$

h: coefficient d'échange de chaleur.

Cependant, cette relation n'est valable qu'au premier ordre, car le plus souvent, le coefficient **h** dépend de la température. On introduira souvent la quantité **Φ / S**, qui est la densité de flux, et qui s'exprime en W/m2.

Le problème sera de déterminer le coefficient **h** dans chacun des modes envisagés ci-après

2.3. Echanges thermiques

Le Principe zéro de la thermodynamique stipule que :

- Deux corps en contact prolongé se mettent en équilibre thermique.

- Deux corps en équilibre thermique avec un troisième sont en équilibre thermique entre eux.

- Tous les corps en équilibre thermique entre eux ont la même température.

On en déduit donc que pour qu'il y ait transfert d'énergie, il faut une différence de température.

Les échanges thermiques entre solides, fluides ou gaz chaud et froid sont dus à plusieurs phénomènes :

- Conduction

- Convection

-Rayonnement

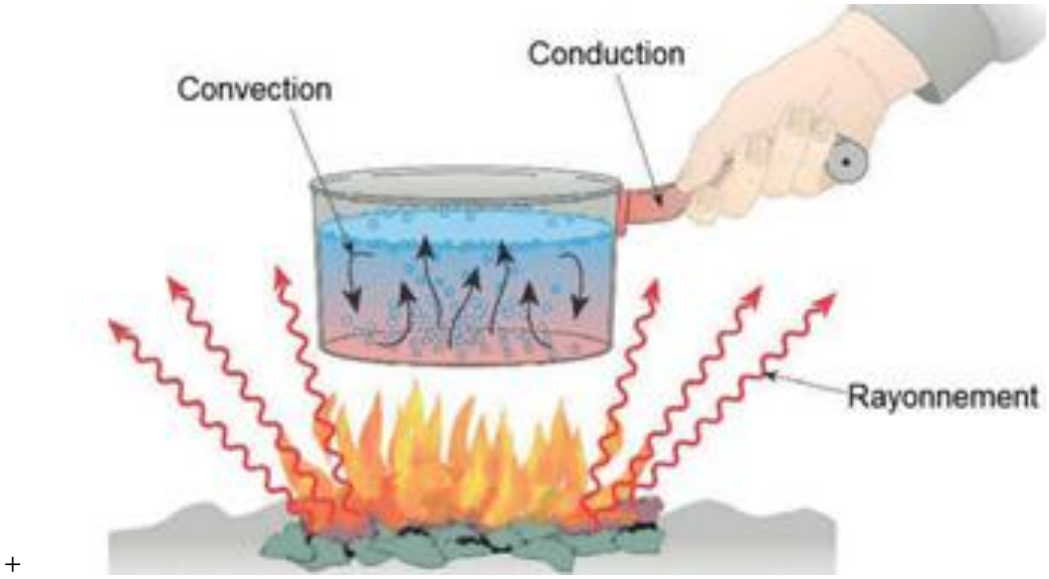


Figure 2.1 : les modes de transfert de la chaleur

La chaleur peut être transmise par conduction, convection ou rayonnement. Bien que les trois processus puissent avoir lieu simultanément, l'un des mécanismes est généralement prépondérant. Par exemple, la chaleur est principalement transmise par conduction à travers les murs en brique d'une maison; l'eau dans une casserole placée sur une cuisinière est surtout chauffée par convection; la Terre reçoit sa chaleur du Soleil en grande partie par rayonnement.

2.4 Transmission par conduction :

La **conduction** est la transmission de la chaleur à l'intérieur d'un matériau (sans déplacement de la matière) .

La conduction ne peut exister que s'il existe des écarts de températures (écoulement continu) c'est à dire si le gradient de température n'est pas nul.. Pour que ce gradient de température existe, il faut une action externe au système pour pouvoir maintenir des conditions de températures données aux limites du système.

Dans le domaine du Génie Civil la conduction est le mode privilégié rencontré dans les parois du bâtiment et le sol.

Selon l'hypothèse de Fourier, la densité de flux est égal à : $\Phi = -\lambda S \, grad \, T$

Pour un transfert unidirectionnel suivant x, on a :

$$\Phi = -\lambda S \, . \, \partial T/\partial x$$

Avec :

Φ est le flux de chaleur transmis par convection (W)

λ la conductivité thermique du milieu (W m-1 C-1)

x le variable d'espace dans la direction du flux (m)

S la surface de la section de passage du flux de chaleur (m^2)

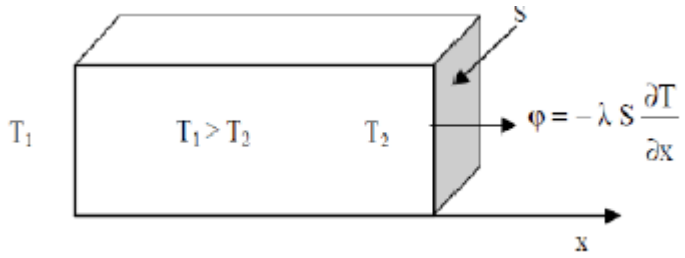


Figure 2.2 : transfert de chaleur par conduction

2.4.1. Conductivité thermique :

C'est la propriété physique d'un matériau qui caractérise sa capacité à conduire plus ou moins facilement la chaleur. Contrairement à l'électricité où il existe des matériaux complètement isolants, pour la conduction il n'existe pas de matériau totalement isolant. Plus un matériau est conducteur de la chaleur, plus sa conductivité thermique est élevée.

Tableau 2.1 : conductivité thermique des différents matériaux

Matériaux conducteurs	Conductivité thermique (λ [W/mK])	Matériaux isolants	Conductivité thermique (λ [W/mK])
Aluminium	230.00	Eau	0.660
Cuivre	380.00	Plâtre haute densité	0.500
Fonte	56.00	Caoutchouc	0.400
Acier	52.00	Plaques de plâtre	0.350
Plomb	35.00	Béton cellulaire	0.270
Granite	3.00	Bois naturel (Chêne)	0.230
Pierre froide (Marbre)	2.90	Plexiglas	0.190
Ardoise	2.10	Panneaux particules de bois	0.140
Polycarbonate alvéolaire	2.00	Liège comprimé	0.100
Pierre meulière	1.80	Carton	0.070
Béton plein	1.75	Fibres minérales (LV/LR)	0.040
PVC	1.70	Laine de verre	0.040
Enduit ciment	1.15	Paille	0.040
Terre cuite (Brique)	1.15	Polyuréthane expansé	0.039
Verre	1.15	Polyuréthane extrudé	0.033
Pierre tendre	1.00	Air	0.028

Remarque : La conductivité thermique d'un matériau est fonction de :

-. Sa densité : plus un matériau est léger plus il est isolant.

-. Sa température : plus un matériau est chaud plus il est conducteur.

- . Sa teneur en eau (humidité) : plus un matériau est humide plus il est conducteur.

2.4.3. Régime permanent:

Les Hypothèses d'un régime permanent dans un matériau homogène sont :

- Si le matériau est homogène alors λ est constante.

-Si les températures sont constantes alors Φ est constant

Avec ces 2 hypothèses :

$$\frac{dT}{dx} = a = Cs$$

L'*équation des températures* dans la paroi est donc de la forme :

T(x) = ax+b

Les deux constantes A et B peuvent être évaluées à partir des conditions aux limites:

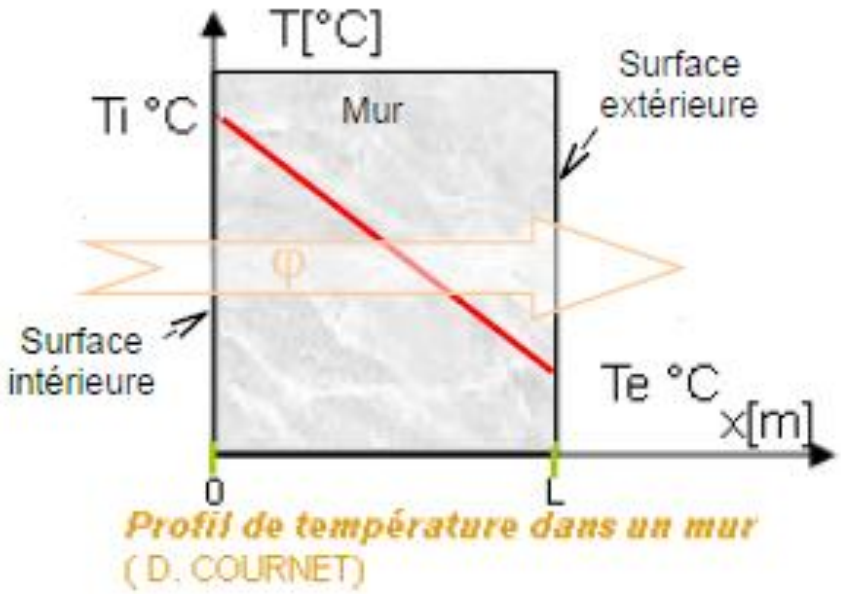


Figure 2.3 : illustration des conditions aux limites

pour $x = 0 \longrightarrow T = T1$.

pour $x = e \longrightarrow T = T2$.

Par l'application de ces conditions, on obtient:

$$A = \frac{T2-T1}{e} \text{ et } B = T1$$

$$T(X) = \frac{T2 - T1}{e}x + T1$$

En régime permanent le flux de chaleur est constant, et la loi de Fourier permet de l'exprimer:

$$\Phi = -\lambda S . \frac{\partial T}{\partial x}$$

$\frac{dT}{dx} = \frac{T2-T1}{e}$ Est la pente de la droite représentée en figure ci-dessus.

$$\Phi = Q = \lambda S . \frac{T2 - T1}{e}$$

$$\Phi = Q = \frac{T2 - T1}{\frac{e}{\lambda S}}$$

2.4.4. Analogie électrique

La conduction thermique dans les solides est semblable à celle de l'électricité dans les conducteurs électriques.

Dans un conducteur, le flux d'électricité est entraîné par une différence de potentiel et le flux de chaleur est lui entrainé par une différence de température.

Conduction électrique	Conduction thermique
Potentiel électrique : V (V)	Température : T (K)
Intensité électrique : I (A)	Flux thermique : Φ (W)
Différence de potentiel : $U = \Delta V = V_1 - V_2$	Différence de température : $\Delta T = T_1 - T_2$
Résistance électrique = R (Ω)	Résistance thermique : $R_{thermique}$ (°K/W)
Conductivité électrique σ ($\Omega^{-1}m^{-1}$)	Conductivité thermique λ (W/m.°K)

On peut donc définir une résistance thermique, jouant dans le transfert de chaleur un rôle comparable à la résistance électrique.

$$R = \frac{e}{\lambda . S} \quad \text{en °K / W}$$

Avec : e est l'épaisseur de la paroi (m)

- λ est la conductivité thermique de la paroi (W/m.°K)

-S est la surface de la paroi (m^2)

La figure 2.4 illustre les différents matériaux dont la résistance thermique est similaire de 2,5 m^2.K/W en fonction de l'épaisseur du matériau.

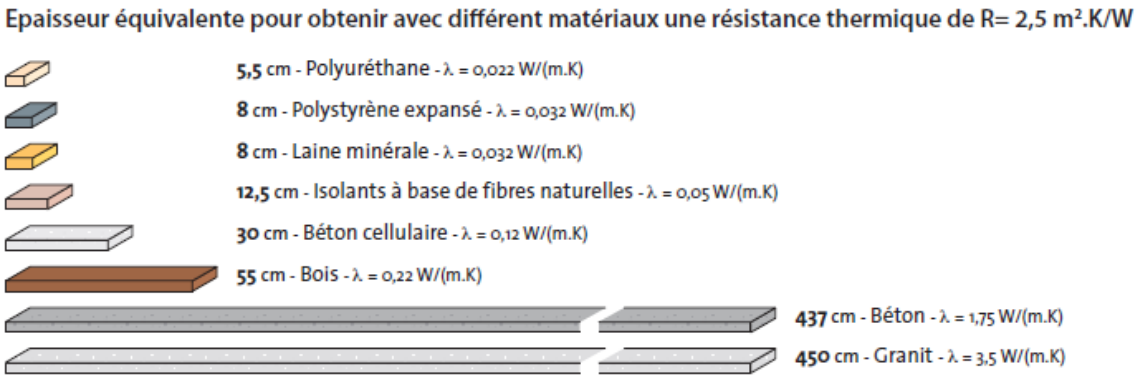


Figure 2.4 : épaisseur équivalente pour obtenir une résistance thermique de 2.5 m^2.K/W

2.5 Exercices

Exercice : 01

Soit un mur plan d'épaisseur e = 0.2m, conductivité λ = 1.2 $W/m.°C$ et de surface S = 15m^2. Les deux faces du mur sont maintenues à des températures de $T1$ = 120°C et $T2$ = 50 °C.

- Déterminer la valeur de température à x=0.1m.

- Calculer le flux de chaleur à travers le mur dans les conditions stationnaires.

Exercice: 02

La densité du flux thermique à travers une paroi plane d'épaisseur 50mm est 70 W/m².

- Calculer la différence de température aux surfaces de la paroi et les valeurs numérique du gradient de température dans celui-ci, si cette paroi est en:

1. Laiton (λ=100 w/mk),
2. Granit (λ=2.5 w/mk),
3. Bois (λ=0.23 w/mk).

Exercice : 03

- Calculer le flux traversant une vitre de 1 m² de surface et de 3.5 mm d'épaisseur. La température de la face interne de la vitre est égale à 10°C, celle de la face externe est égale à 5 °C. En déduire la résistance thermique de la vitre.

Conductivité thermique du verre : = 0.7 $W.m{-}1.K{-}1$.

Pour les mêmes températures de paroi, calculer le flux traversant un m² de mur de briques de 26 cm d'épaisseur. En déduire la résistance thermique.

Conductivité thermique des briques : $\lambda\ Briques$ = 0.52 $W.m{-}1.K{-}1$.

2.4.5. Paroi composite à faces parallèles: (Paroi multicouches)

On considère un mur plan de dimensions pratiquement infinies, constitué de **n** couches de matériaux différents en série (voir Figure 2.5). Pas de perte ou production de chaleur : **Φ** est Identique dans tout le solide.

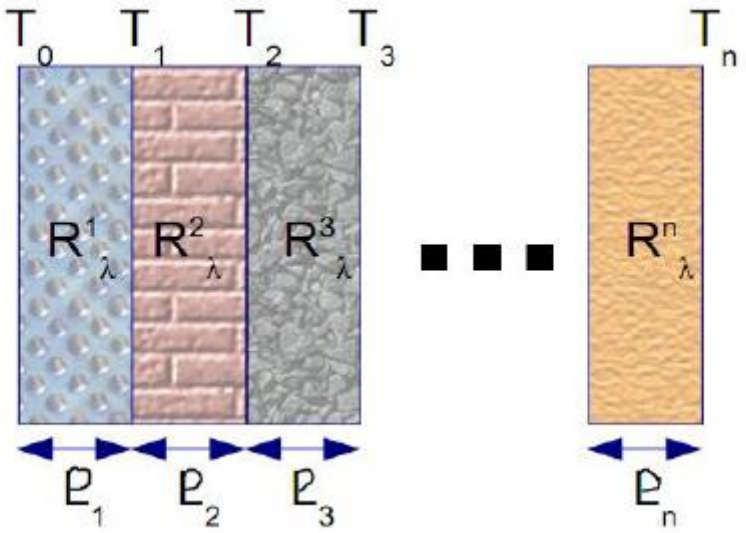


Figure 2. 5 : *Résistance thermique d'un mur composite :* ***association en série***

Les couches ont par contre des résistances thermiques différentes (,,,…). On écrit :

$$\Phi = \frac{T_0 - T_1}{R_\lambda^1} \longrightarrow T_0 - T_1 = \Phi R_\lambda^1$$

$$\Phi = \frac{T_1 - T_2}{R_\lambda^2} \longrightarrow T_1 - T_2 = \Phi R_\lambda^2$$

$$\Phi = \frac{T_2 - T_3}{R_\lambda^3} \longrightarrow T_2 - T_3 = \Phi R_\lambda^3$$

$$\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots$$

$$\Phi = \frac{T_{n-1} - T_n}{R_\lambda^n} \longrightarrow T_{n-1} - T_n = \Phi R_\lambda^n$$

On additionne les n équations :

$T0-Tn = \Phi\,(R1+R2+R3+\cdots+Rn)$ $(S = 1\ m^2)$

RTotale= $\mathbf{R\lambda 1+R\lambda 2+R\lambda 3+\cdots+R\lambda n}$

2.4.6. Résistance thermique d'un mur composite : (association en parallèle)

Soit un mur plan de dimensions pratiquement infinies, constitué de **n** couches de matériaux différents en parallèle (voir Figure 2.6). Pas de perte ou production de chaleur.

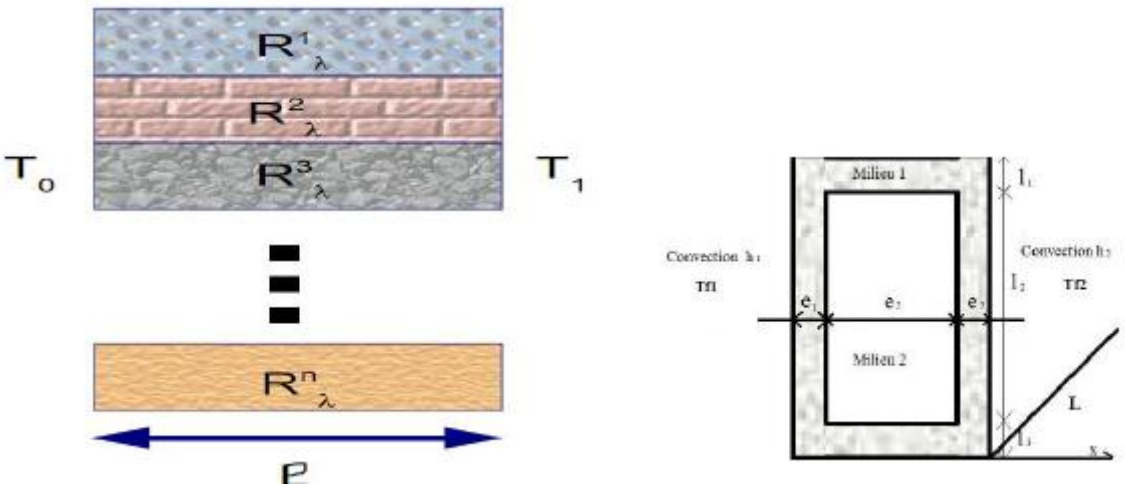


Figure 2.6 : *Résistance thermique d'un mur composite :* ***association en parallèle***

Les couches ont des résistances thermiques différentes („„…) et des flux différents (**Φ1, Φ2, Φ3,… Φn**). En utilisant la loi d'association des résistances en parallèle. On peut écrit :

$$\Phi_1 = \frac{T_0 - T_1}{R_\lambda^1},\ \Phi_2 = \frac{T_0 - T_1}{R_\lambda^2},\ \Phi_3 = \frac{T_0 - T_1}{R_\lambda^3},\ \ldots\ldots\ \Phi_n = \frac{T_0 - T_1}{R_\lambda^n}$$

$$\Phi = \Phi_1 + \Phi_2 + \Phi_3 + \ldots\ldots + \Phi_n = (T_0 - T_1)\left(\frac{1}{R_\lambda^1} + \frac{1}{R_\lambda^2} + \frac{1}{R_\lambda^3} + \cdots + \frac{1}{R_\lambda^n}\right)$$

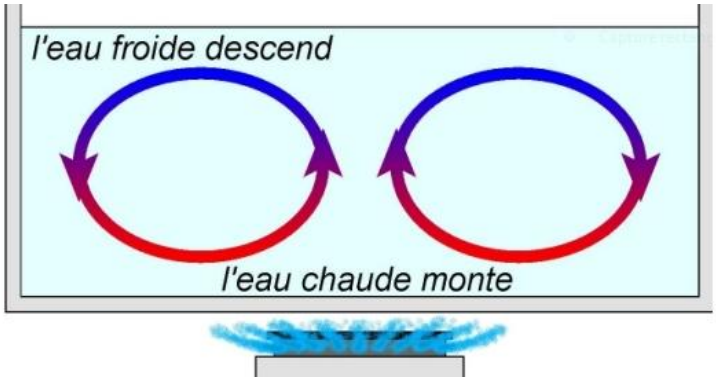
$$\Phi = (T_0 - T_1)A\left(\frac{1}{R^1} + \frac{1}{R^2} + \frac{1}{R^3} + \cdots + \frac{1}{R^n}\right)$$

2.6. Transmission par Convection :

On distingue deux types de convection :

- Convection libre ou naturelle : mouvement du fluide dû à des différences de densité

- Convection forcée : mouvement du fluide dû à une action mécanique extérieure : ventilateur, pompe.



.

Figure 2.7 : exemple du transfert par convection

La Loi fondamentale de la convection : Loi de Newton

$$q = hS\,(T_p - T_f)$$

q : flux de chaleur échangé par convection (w).
h : Coefficient de transfert de chaleur par convection (W/m²/°C). h (forme et nature des surfaces, vitesse du fluide, propriétés physiques du fluide).
S : surface de contact solide fluide (m²).
Tp ,Tf température de la paroi et du fluide loin du solide °C

En appliquant l'analogie électrique (U = RI)

$(Tp - T\infty) = \Phi / h.S = R.\Phi$ et $R = 1 / h.S$

R : Résistance thermique d'échange superficiel [K/W].

avec $R_{se} = 1/ h_{se}$ résistance à l'échange thermique sur la surface extérieure .

$R_{si} = 1/ h_{si}$ résistance à l'échange thermique sur la surface intérieure .

Tableau 2.2 : *Résistances superficielles des parois entre couches d'air*

RESISTANCES SUPERFICIELLES EN m² . Kelvin / Watt		PAROI EN CONTACT AVEC L'EXTERIEUR			PAROI EN CONTACT AVEC UN AUTRE LOCAL (Chauffé ou non) un comble ou un vide sanitaire		
		Rsi	Rse	Rsi+Rse	Rsi	Rse	Rsi+Rse
PAROI VERTICALE		0,13	0,04	0,17	0,13	0,13	0,26
PAROI HORIZONTALE AVEC FLUX ASCENDANT		0,10	0,04	0,14	0,10	0,10	0,20
PAROI HORIZONTALE AVEC FLUX DESCENDANT		0,17	0,04	0,21	0,17	0,17	0,34

- Pour un mur monocouche :

$$R = \frac{1}{h_{si}} + \frac{e}{\lambda} + \frac{1}{h_{se}} \longrightarrow K = \frac{1}{\frac{1}{h_{si}} + \frac{e}{\lambda} + \frac{1}{h_{se}}}$$

-Pour un mur multicouche

$$R = \frac{1}{h_{si}} + \sum_{i=1}^{n} \frac{e_i}{\lambda_i} + \frac{1}{h_{se}} \longrightarrow K = \frac{1}{\frac{1}{h_{si}} + \sum_{i=1}^{n} \frac{e_i}{\lambda_i} + \frac{1}{h_{se}}}$$

2.7. Transmission par rayonnement

Le soleil nous chauffe à distance en traversant l'espace vide où il n'y a donc ni conduction, ni convection. Ce mode de transfert de la chaleur est le rayonnement électromagnétique. Une partie de ce rayonnement électromagnétique est visible. C'est la lumière visible.

La couleur intervient dans l'échange thermique par rayonnement : Les corps noirs sont les plus sensibles aux rayonnements. C'est pourquoi les tubes d'un chauffe-eau solaire sont noirs.

Les corps blanc le sont beaucoup moins. C'est pourquoi les maisons des pays chauds sont plutôt blanches pour éviter de trop chauffer.

Les matériaux métalliques bloquent le rayonnement. C'est pourquoi les couvertures de survie ou les isolants minces sont métallisés.

4.6.1. Expression du flux thermique rayonnant émis par une paroi

La chaleur échangée par rayonnement dépend de la température des corps et de leur émissivité (liée à leur couleur). Une expression simplifiée du flux de chaleur par rayonnement est la suivante :

$$\varphi = \varepsilon . \sigma . (T_S^4 - T_\infty^4)$$ Avec :

:φ : le flux de chaleur en W/m2

ϵ : l'émissivité du matériau (sans unité),

: la constante de Stefan – Boltzmann (5,6703.10-8 W/m2 .K^{-4})

TS : la température en surface de la paroi en °C ou K

T∞ : la température à l'infini, c'est à dire suffisamment loin de la paroi en °C ou K.

2.8. Transfert de chaleur dans une maison

Le chauffage ou le refroidissement d'une maison est un exemple de ces trois processus de transfert de chaleur qui se produisent en même temps.

- La conduction peut réchauffer la maison en été. La chaleur de l'air extérieur est transférée dans la maison par les murs ou le toit. En hiver, elle la refroidit. La chaleur de l'air chaud à l'intérieur de la maison est transférée à l'extérieur par les murs ou le toit.

- Le phénomène de convection se produit dans chacune des pièces, alors que l'air plus chaud s'élève vers le plafond et que l'air plus frais revient vers le plancher. La convection explique En outre pourquoi il fait toujours plus chaud au rez-de-chaussée qu'au sous-sol.

- Enfin, le rayonnement thermique transfère la chaleur du Soleil au toit de la maison, aux

Fenêtres, etc…

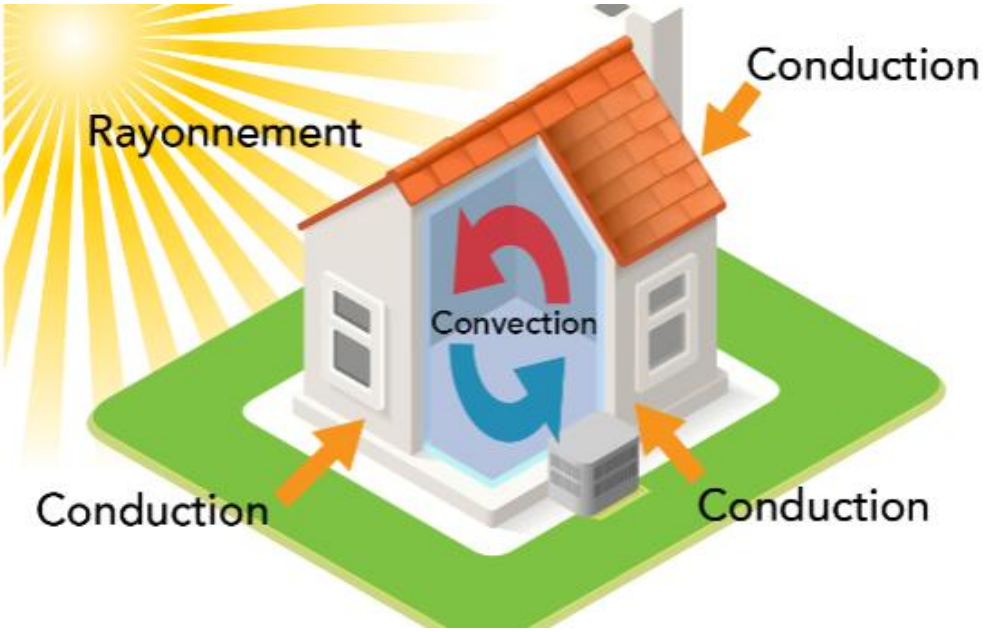


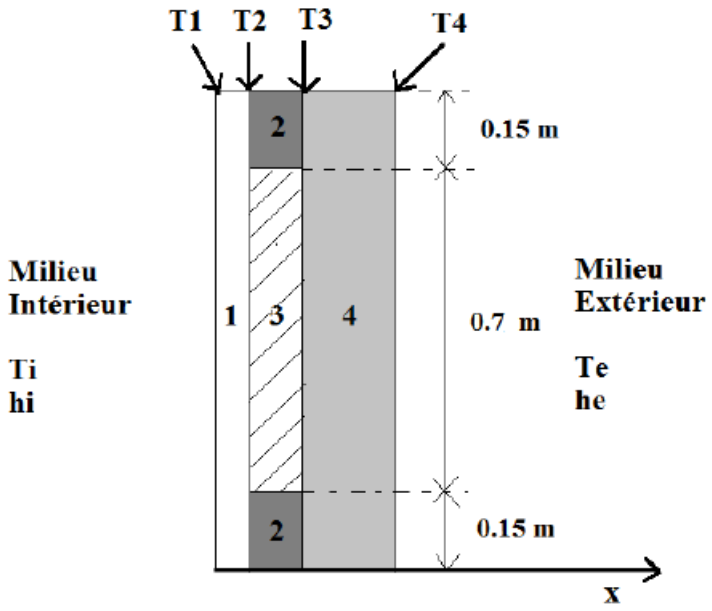
Figure 2.8 : transfert de chaleur dans une habitation

2.9 Exercices

Exercice 01 :

La figure ci-dessous représente la coupe transversale d'une paroi composite. Les températures intérieures et extérieures valent respectivement Ti = 20°C et Te = 5°C.

On note hi = 10 $W.\ m{-}2.\ K{-}1$ et he = 15 $m{-}2.\ K{-}1$ respectivement les coefficients d'échange par convection entre le milieu ambiant et la surface de la paroi intérieure et extérieure. Les caractéristiques des différents matériaux constituants la paroi sont les suivantes :



Indices	Conductivités thermiques en W.m-1.K-1	Epaisseurs en cm
1	0.35	1
2	0.15	3
3	0.03	3
4	1.40	15

1. Calculer la résistance thermique totale RT pour 1m² de paroi.
2. Calculer le flux surfacique Q qui traverse laparoi.
3. Calculer les températures T1, T2, T3 et T4.

Exercice 02 :

Le mur d'un bâtiment est constitué de briques de 38 cm d'épaisseur (notée *d)*, de Conductivité thermique λ□ □= 0.8 W/m.K. La température de l'air intérieur est *T1*=20 °Cet celle de l'extérieur est *T2* = – 15 °C.

Les coefficients thermiques moyens par convection sont respectivement *h1* = 10 W/m2K et *h2* = 20 W/m2K pour l'air intérieur et pour l'extérieur

1- Calculer la résistance thermique globale (interne et de contact) du mur par unité de Surface.

2- En déduire le flux thermique surfacique, ainsi que les températures *T1* et *T2* du mur respectivement sur sa surface intérieure, puis extérieure.

Exercice 03 :

Un four est constitué de briques réfractaires de 15 cm d'épaisseur (conductivité λ□ □ =1 W/m.K). Il est recouvert d'un matériau isolant de conductivité λ□ =0.08 W/ m.K.

La température de la paroi interne du four est 1300 °C, la température de la paroi externe de l'isolant est 300 °C. Calculer l'épaisseur d'isolant nécessaire pour limiter les pertes thermiques à 1000 W/m2 (on considère donc pour simplifier que l'épaisseur d'isolant n'a pas d'influence sur la température extérieure de celui-ci).

Exercice 04 :

Un mur de 3m d'hauteur et de 5m de largeur est composé (dans le sens de la salle Vers l'extérieur) par les matériaux suivants :

- Une couche d'un matériau isolant, k=0.026 W/.°C, de 3cm d'épaisseur.
- Une couche de ciment, k=0.22 W/.°C, de 2cm d'épaisseur.

- Des briques superposées, k=0.72 W/.°C, de 16cm x 22cm de sections droite, séparés par 3cm des couches de ciment.

- Une couche de ciment de 2cm d'épaisseur.

Etudier le taux de transfert thermique ?

Données : la salle et l'extérieur sont à 20°C et -10°C avec un coefficient de transfert thermique par convection de 10 W/m2. °C et 25 W/m2. °C respectivement.

CHAPITRE 3 :
LE CONFORT THERMIQUE

Le confort thermique fait partie intégrante du bien-être des occupants d'un bâtiment et peut avoir un impact non négligeable sur leur santé.

3.1. Les besoins de l'occupant

Le rôle premier d'un bâtiment est de protéger ses occupants des rigueurs du climat extérieur. Un bâtiment confortable assure à ses habitants un climat intérieur agréable et peu dépendant des conditions extérieures, notamment météorologiques et acoustiques. La gestion optimale de l'énergie, quoique très importante du point de vue de son impact sur l'environnement, intervient en deuxième priorité, lorsque les conditions de confort sont satisfaites.

Les exigences actuelles peuvent être classées en plusieurs catégories, qui interagissent entre elles : exigences de confort thermique, exigences de qualité d'air, besoins en éclairage, protection acoustique et exigences en termes de consommation d'énergie.

3.2. Définition du confort

La définition du confort thermique selon ASHRAE et EN ISO 7730 :

Ce sont les conditions dans lesquelles on ne peut dire si l'on a chaud ou froid vis à vis de son environnement

Le confort thermique est une sensation liée à la chaleur qui est propre à chacun. En hiver, un bon confort thermique doit garantir une sensation suffisante de chaleur. En été, il doit limiter cette chaleur pour éviter les surchauffes• Ce qui induit une certaine subjectivité à la notion de confort …

En fonction de l'activité, la température de confort est différente et il n'y a pas une température qui convienne à tout le monde.

3.3. Les paramètre du confort thermique

Les sensations thermiques de l'homme sont liées principalement à l'équilibre thermique du corps dans son ensemble.

3. 3.1. Les facteurs liés à l'individu :

-Le métabolisme, qui est la production de chaleur interne au corps humain permettant de maintenir celui-ci autour de 36,7°C. Un métabolisme de travail correspondant à une activité particulière s'ajoute au métabolisme de base du corps au repos.

- L'habillement**,** qui représente une résistance thermique aux échanges de chaleur entre la surface de la peau et l'environnement.

3.3.2. Les facteurs liés à l'environnement :

- La température ambiante de l'air **[Ta]**. Compte tenu de son importance dans l'intensité des échanges thermiques, il est naturel de s'intéresser à la température qui caractérise l'ambiance du logement.

Les spécialistes ont défini plusieurs températures destinées à caractériser les échanges thermiques notamment par convection et par rayonnement.

La plupart des personnes considèrent que 20°C en hiver, 26°C en été sont des températures d'air associées à une appréciation de confort.

- Température de l'air normalisée

Pour résoudre le problème de subjectivité, la norme EN 12831 définit les températures normales en fonction des locaux.

Tableau 3.1 : les températures normales en fonction des locaux.

Locaux types	*Température intérieure de base [°C]*
- Hôpitaux - Salons d'habillage - Salles d'eau, salles de douches	**21**
- Locaux d'habitation courants - Bureaux, salles de cours et de conférence - Cafés, cafétérias, restaurants	**19**
- Magasins, musées (vêtements d'extérieur conservés)	**17**
- Cuisines professionnelles - Gymnases	**15**
- Ateliers d'activité physique assez intense	**12**
- locaux de manutention lourde	**10**
- Garages chauffés (vêtements extérieurs conservés)	**5**

- La température moyenne des parois [**Tp]**. Elle correspond à la moyenne des températures des murs, dalles, plafonds et ouvrants. Plus le bâtiment n'est déprédatif et donc faiblement isolé. De façon simplifiée, on définit une température de confort ressentie, appelée aussi « température opérative » ou « température résultante sèche », qui est la moyenne de la température de l'air et de celle des parois (Trs) :

Trs = (T°air + T°parois) / 2

- L'humidité relative de l'air **(HR)** C'est la quantité de vapeur d'eau dans l'air par rapport à la capacité maximale que ce dernier peut en contenir.

Si l'hygrométrie est à 0 %, l'air est parfaitement sec : il ne contient pas d'eau. Si elle est à 100 % l'air est saturé en eau et toute quantité d'eau que l'on y ajouterait provoquera la formation de gouttelettes, de nuages, puis de précipitations. Pour un confort optimal et pour une température de l'air aux environs de 22°C, il est recommandé que l'humidité relative soit gardée entre 40 et 60 %.

- La vitesse de l'air, qui influence les échanges de chaleur par convection. Dans le bâtiment, les vitesses de l'air ne dépassent généralement pas 0,2 m/s. **1)**:

Tableau 3.2 : la vitesse de l'air du confort

Vitesse résiduelle de confort (m/s)	
Locaux d'hébergement, hôpitaux bureaux, salles de cours et de conférence	0,12
Locaux commerciaux Atelier	0,17
Locaux sportifs, grands magasins, bâtiments du transport, locaux industriels	0,25

3.4 .Les relations confort - facteurs

3.4.1. Confort - température

Le confort thermique est une sensation liée à la chaleur qui est propre à chacun. En hiver, un bon confort thermique doit garantir une sensation suffisante de chaleur. En été, il doit limiter cette chaleur pour éviter les surchauffes

Confort = équilibre entre l'homme et l'ambiance. La diffusion de chaleur entre l'individu et l'ambiance s'effectue selon divers mécanismes, la figure 3.1 illustre ces échanges thermiques.

Plus de 50 % des pertes de chaleur du corps humain se font par convection avec l'air ambiant (convection et évaporation par la respiration ou à la surface de la peau). Les échanges par rayonnement à la surface de la peau représentent jusqu'à 35 % du bilan alors que les pertes par contact (conduction) sont négligeables (< 1 %). Le corps perd également 6 % de sa chaleur à réchauffer la nourriture ingérée.

Figure 3.1 : Échanges thermiques de l'individu

3.4.2 Confort - humidité

Le confort est un équilibre entre la température et l'humidité

Une humidité trop faible assèche l'air et peut provoquer des problèmes de santé et d'inconfort, tandis qu'une humidité trop élevée rend l'air moite, augmente la sensation de chaleur et favorise le développement de bactéries, d'acariens et de moisissures.

L'inconfort n'apparaît que lorsque : L'humidité relative est inférieure à 30 %, L'humidité relative est supérieure à 70. La plage de confort hygrothermique est représentée sur la figure 3.2 avec *:*

Zone 1 : trop sec

Zone 2 et 3 : Développement des bactéries et des champignons

Zone 3 : Développement des acariens

Zone 4 : Polygone de confort hygrothermique

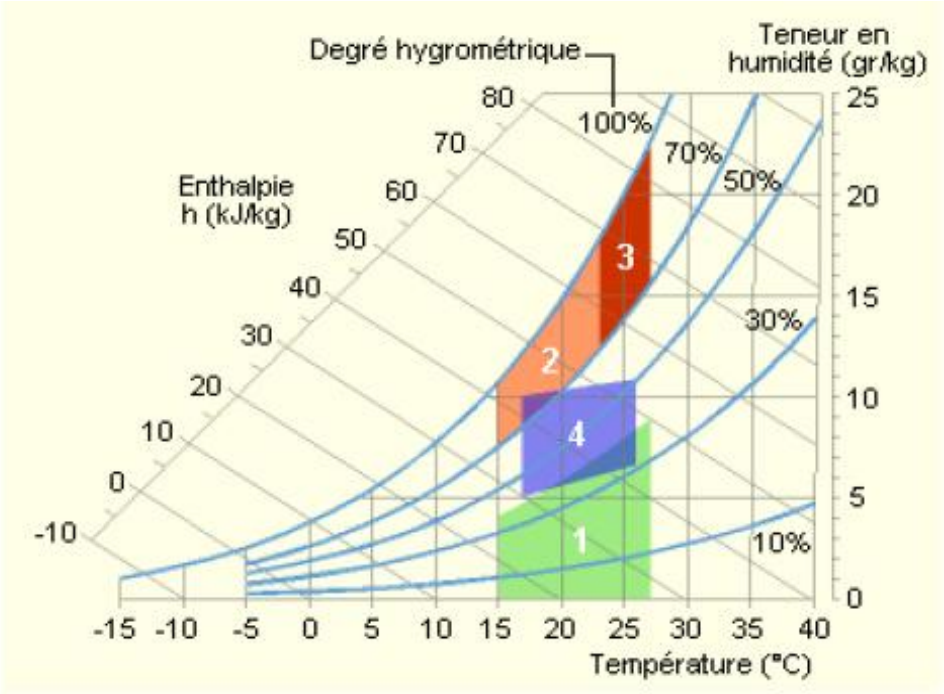


Figure 3.2 : plage du confort thermique

3.4.3 Confort- activité

Les valeurs du métabolisme en fonction des différentes activités de l'individu sont représentées sur le tableau 3.3.

Tableau 3.3 : valeurs du métabolisme pour diverses activités

Activité	W/m²	met
Repos,couché	45	0,8
Repos, assis	58	1
Activité légère, assis (bureau, école)	70	1,2
Activité légère, debout (laboratoire, industrie légère)	95	1,6
Activité moyenne, debout (travail sur machine)	115	2,0
Activité soutenue (travail lourd sur machine)	175	3,0

3.5. L'inconfort thermique :

L'inconfort thermique peut être causé par un refroidissement ou un réchauffement local non désiré du corps.

Les causes d'inconfort locales les plus courantes sont :

1 - l'absence de chaleur rayonnante comme celle du soleil ou d'un poêle ou d'un mur chaud

2 - L'écart de température entre l'air et les parois :

A partir d'une différence de 4°C, l'écart de température devient perceptible. Les surfaces froides (exemple : fenêtres ou murs non isolés) créent alors des sensations d'inconfort.

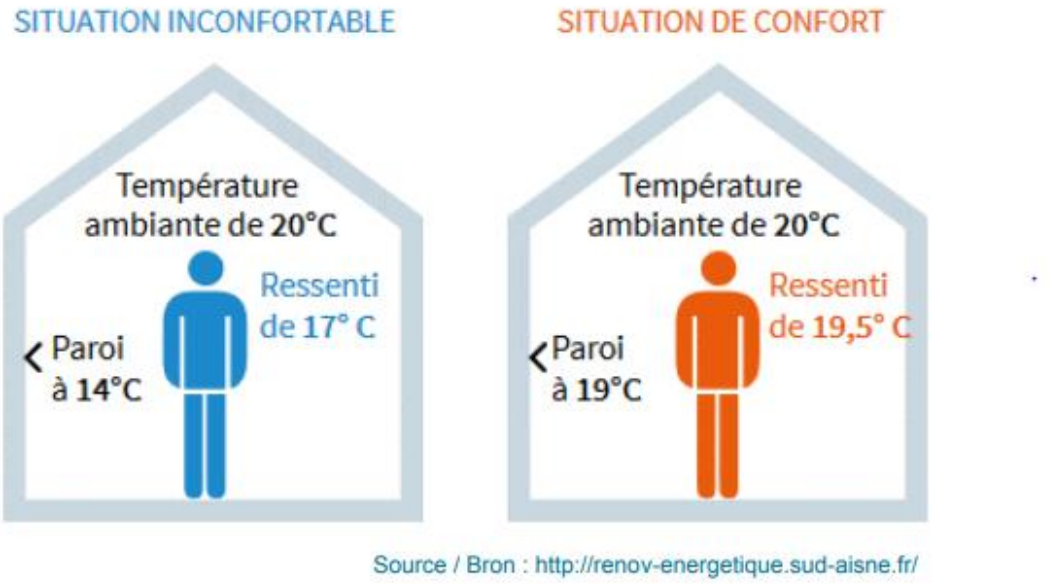


Figure 3.3 : Températures du confort et de l'inconfort

3. Le gradient vertical de température de l'air : L'écart maximum entre la température de l'air au niveau de la tête et celle au niveau des pieds ne doit pas dépasser 3°C.

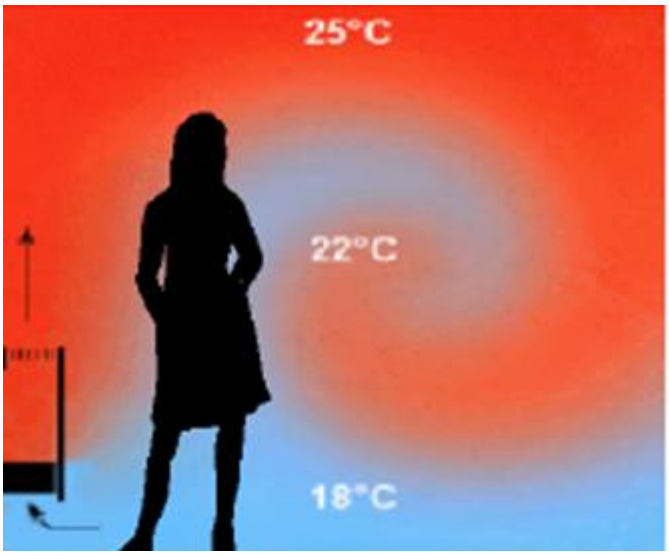


Figure 3.4 : Hétérogénéité verticale de la température

4. Le déplacement de l'air : Des variations rapides de mouvements d'air peuvent causer des courants d'air (un déplacement de l'air à une vitesse de 1 kilomètre par heure (0,27 m/s) provoque une sensation de refroidissement d'environ 3°C).

5. Taux d'humidité dans l'air : Il doit être uniforme car la conduction de la chaleur dépend en partie de l'hygrométrie. Si des appareils de chauffage modifient la qualité de l'air, il se forme des masses d'air avec différents taux d'humidité.

3.6. Comment éviter l'inconfort thermique ?

Pour assurer le confort des individus il faut :

1. Maintenir une température agréable par une bonne isolation du bâtiment (combles/plafonds, murs, surfaces vitrées, sols), un système de chauffage Performant (et idéalement rayonnant), des ouvertures au soleil. Une protection contre le rayonnement direct du soleil doit éviter les inconforts d'éblouissement et de surchauffe.

Figure 3.5 : isolation thermique

2. Développer une bonne inertie thermique dans le bâtiment **:** capacité des matériaux à stocker puis rayonner de la chaleur pour obtenir une température ressentie agréable.

3. Contrôler les mouvements d'air (étanchéité et système d'aération générale bien conçus et bien entretenus).

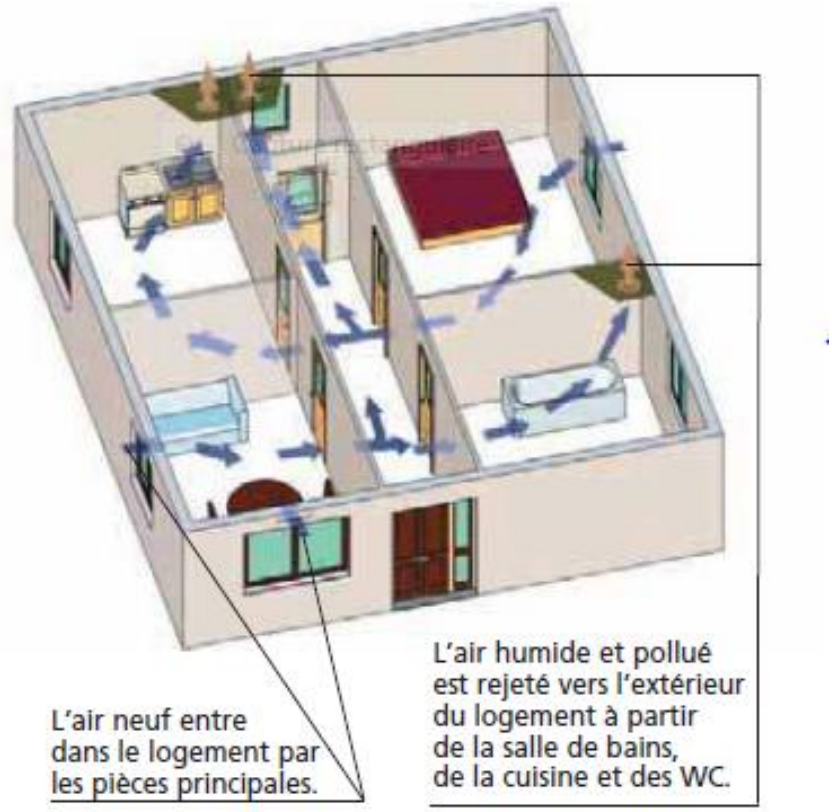


Figure 3.6 mouvement de l'air dans une habitation

4. Evacuer l'humidité **:** il est impératif d'évacuer la vapeur d'eau due à l'activité des occupants car une humidité relative supérieure à 70% provoque un Inconfort thermique important. De plus elle peut se condenser sur les vitres et crée des moisissures sur les parois, ce qui est néfaste pour la santé.

Chapitre 4 :
Déperditions thermiques

Dans les maisons mal isolées, les déperditions thermiques sont importantes. Difficile alors de conserver la chaleur à l'intérieur de la maison pendant l'hiver, mais aussi la fraîcheur pendant l'été ; donc les déperditions d'énergie rendent un logement inconfortable et particulièrement difficile à chauffer

4.1. Définition :

La déperdition thermique est une fuite d'énergie dans les logements. Elle désigne la perte d'énergie sous forme de chaleur au sein des maisons et appartements mal isolés. Cette déperdition survient dès que la température intérieure est supérieure à la température extérieure, ou inversement.

Le DTR C3-2 définit les déperditions comme suit :

Les déperditions calorifiques sont égales au flux de chaleur sortant d'un local , ou d'un groupe de locaux , par transmission de chaleur à travers les parois et par renouvellement d'air , pour un degré d'écart de température entre l'intérieur et l'extérieur .Elles d'expriment en watts par degrés Celsius W/°c .

4.2. Localisation des déperditions

Les déperditions thermiques désignent la perte de chaleur d'un bâtiment, qui s'échappe vers l'extérieur lorsque la température intérieure est supérieure à la température extérieure. Ces pertes peuvent survenir par les parois (murs, toit, fenêtres), par les ponts thermiques (zones de rupture d'isolation) ou par le renouvellement d'air (systèmes de ventilation) .

Les déperditions thermiques entraînent une surconsommation de chauffage, une diminution du confort thermique et peuvent dégrader le bâtiment.

Dans un logement, les pertes d'énergie se produisent au niveau de chaque paroi. Parmi ces points critiques : le toit, les murs, ou encore les fenêtres et les portes ; la figure 4.1 illustre ces points.

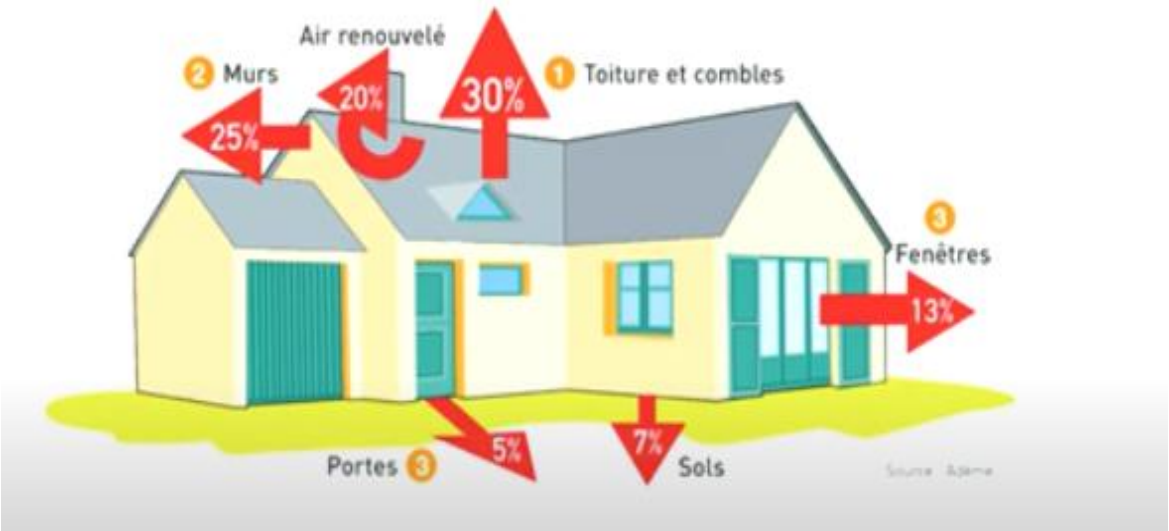


Figure 4.1 : Taux des déperditions thermiques dans une habitation

4.2 .1 le toit : le toit est le premier point faible d'un logement en matière d'isolation ; entre 25 et 30 % des déperditions thermiques se produisent par le toit .Plusieurs raisons expliquent ce phénomène. Le toit présente une grande surface de contact entre l'intérieur et l'extérieur. De plus, la toiture est exposée en permanence aux vents et la chaleur produite dans la maison à tendance à monter et à s'accumuler sous la toiture.

4.2.2 Les murs : les murs laissent s'échapper entre 20 et 25 % de la chaleur de la maison. Il s'agit donc de la deuxième cause recensée de pertes de chaleur.

4.2.3 les systèmes d'aération : pourtant primordiales pour conserver une maison saine ; ils sont autant de passages qui permettent à l'air chauffé de s'échapper… mais aussi au froid extérieur d'entrer dans la maison, entre 20 à 25 % des déperditions thermiques ont lieu par l'air renouvelé, et par les diverses fuites.

4.2.4 les fenêtres : 10 à 15 % des déperditions thermiques d'une maison mal isolée ont lieu au niveau des fenêtres. Certaines maisons anciennes sont dotées de parois vitrées peu isolantes, notamment des fenêtres à simple vitrage. Les pertes thermiques sont alors conséquentes. Des fuites d'air se produisent également au niveau des portes, plus particulièrement lorsque les joints sont endommagés.

4.2.5 Les ponts thermiques : sont les zones discontinues entre les matériaux et les parois de la structure ; ils provoquent une rupture de la barrière isolante ainsi qu'ils sont responsables de **5 à** 10 % des pertes de chaleur dans les maisons.

4.2.6 Les planchers bas : Lorsque les planchers bas sont mal isolés, le sol devient conducteur de froid.

Figure 4.2 : Les déperditions thermiques

4.3. L'importance de combattre les déperditions thermiques :

Lorsque les déperditions thermiques sont importantes, il devient très difficile de chauffer une pièce, et bien souvent, de chauffer toute la maison, ce qui exige une quantité importante de combustible pour arriver à une chaleur suffisante.

Dans la pire des configurations, une maison laisse s'échapper 95% de la chaleur produite par le système de chauffage ! Heureusement, des solutions existent pour remédier à ce problème de déperdition thermique : l'isolation.

4.4. Calcul des déperditions thermiques

Une déperdition thermique se produit quand la température extérieure est inférieure à la température à l'intérieur du bâtiment. Pour estimer les déperditions thermiques d'un logement, la première solution consiste à réaliser un bilan énergétique.

Les déperditions totales dans un local se calcule par la relation suivante :

$$\underbrace{P_{déper}}_{\text{DEPER}} = \underbrace{\sum (U \times S \times \Delta T)}_{\text{PAROIS}} + \underbrace{\sum (\Psi \times L \times \Delta T)}_{\text{PONTS}} + \underbrace{0{,}34 \times (Q_{ven} + Q_{inf}) \times \Delta T}_{\text{AIR}}$$

avec : $u = 1 / \sum R_i$ le coefficient de transmission surfacique , S : surface

Ψ : coefficient linéique (pont thermique)

L: la longueur

0.34 : capacité thermique de l'air .

$(Q_{ven} + Q_{inj})$ Renouvellement d'air et infiltration

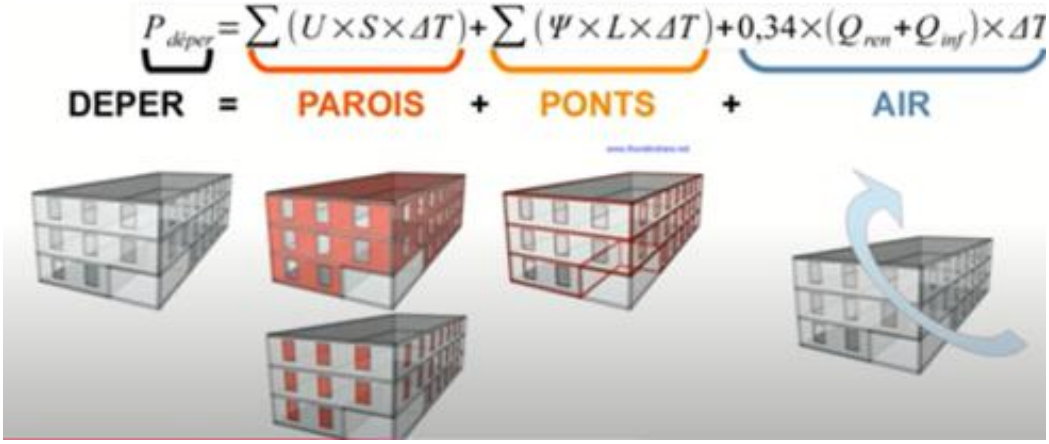


Figure 4.3 : illustration des déperditions

4.4.1. Déperditions des parois

Premièrement, il faut identifier les caractéristiques du logement ou bâtiment : superficie, hauteur sous plafond, type et épaisseur de l'isolation, nombre et type de fenêtres et portes les différentes parois sont représentées sur la figure 4.4 :

Figure 4.4 : les différentes parois dans une habitation

la déperdition thermique est donnée par la formule :

D = U x S x ΔT

Exemple de calcul :

-les murs

D = 0.21 .500.(19 - (-9)) = 0.21 .500. 28 = 2900w

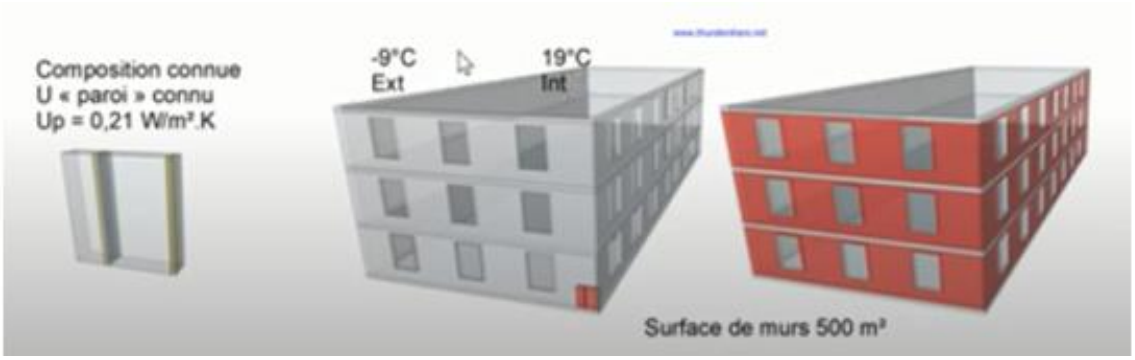


Figure 4.5 : illustration de l'exemple de calcul des murs

- **<u>les fenetres :</u>**

D = 1.2 .130 . 28 = 4400 w

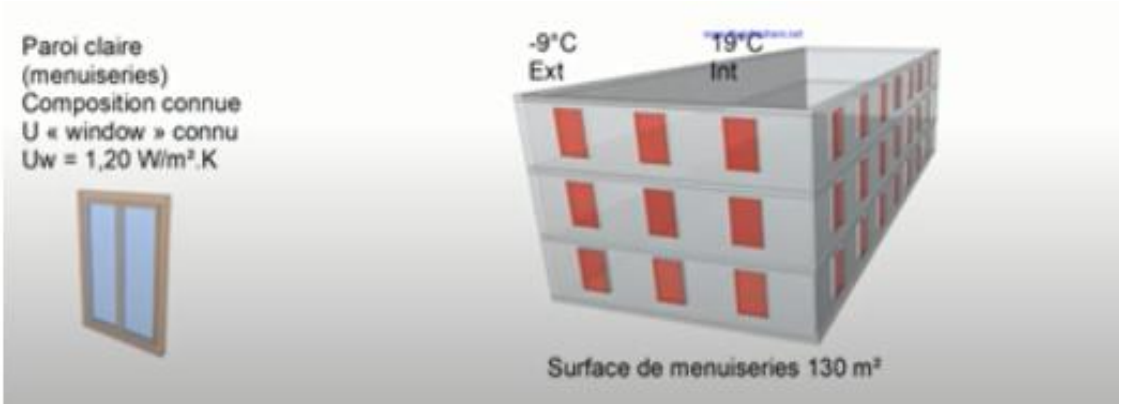


Figure 4.6: illustration de l'exemple de calcul des fenetres

note : pour les planchers on fait la meme chose **.**

4.4.2. : Déperditions linéiques (ponts thermiques) :

Les ponts thermiques désignent tout défaut d'isolation qui entraîne des pertes de chaleur et diminue la résistance thermique d'un logement . Il peut s'agir de la surface entre les murs et les plafonds, entre les murs et le contour des fenêtres ou des portes, au niveau des prises électriques et des sorties de câble.

Les déperditions linéiques s'expriment par la formule :

$$\mathbf{D = \Sigma\, L \,.\, \psi \,.\, \Delta T}$$

L : est la longueur de paroi considérée (périmètre, côté, hauteur)

Ψ : coefficient linéique (pont thermique) exprimé en W/(m.K) prend des valeurs en fonction du type de la liaison : (voir le DTR C3- 2)

1 - Ψ =0.33 liaison Mur extérieur /Plancher terrasse

2. Ψ =0.17 liaison entre deux murs extérieurs

3. Ψ =0.31 liaison Mur extérieur /Plancher bas

4. Ψ =0 liaison entre menuiserie des ouvrants /mur extérieur

Les différentes liaisons sont présentées sur la figure 4.7 :

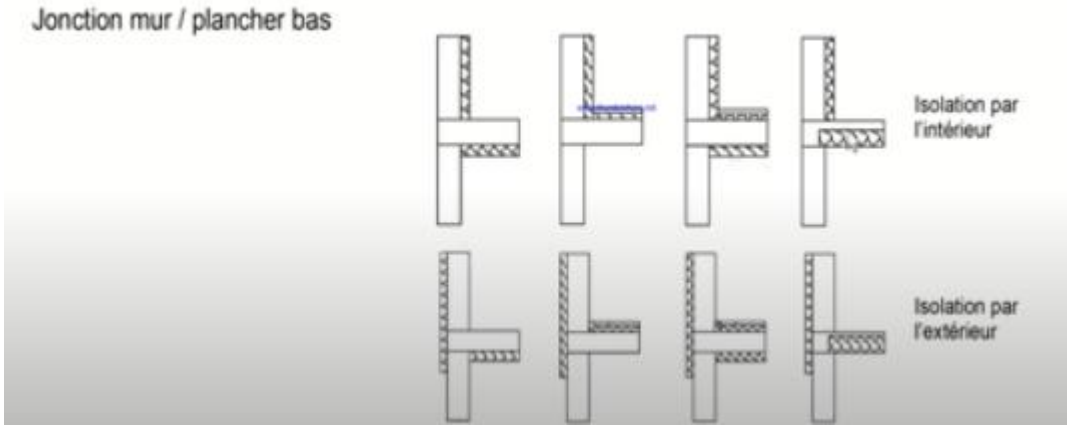


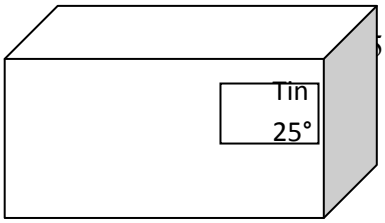
Figure 4.7 : jonction mur / plancher bas

- Exemple de calcul :

soit une parois qui comprend une ouverture , le calcul de la déperdition linéique se fait par la relation

D = Ψ . L . ΔT (L : périmètre de l'ouverture)

dimensions de l'ouverture : 1m .1.5 m



Tex T D = 0.25. (1+1.5) .2. 15 =

10°

4 .4.3. Déperditions volumiques :

la perte d'énergie rapportée au volume habitable du bâtiment exprime en Watt par mètre cube pour une variation d'1 degré Celsius entre la température extérieure et intérieure (W/m3).

Dv = 0.34 . V . ΔT. ζ

ζ: taux du renouvèlement d'air

Exemple de calcul :

soit un local dont les dimensions sont : l = 3m , L = 5m , H = 4 m

T ex =0° , T in = 18 °

le volume du local = 3.4.5 = 60 m^3

ΔT = 18 °c

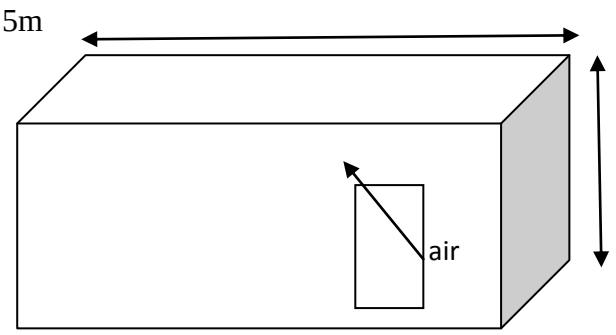
. ζ = 0.5

Dv = 0.34 . 60.18.0.5 =

. ζ: taux de renouvellement d'air

. ζ=0.5 (1 f/ 2h)

. ζ=1 (1fois /h) . ζ=2(2f/h)



4.5. Bases de calcul :

Sur la base du **DTR C3-2**, tout concepteur se doit de :

- Définir les volumes thermiques.
- Calculer pour chaque volume thermique les pertes par transmission et les pertes par renouvellement d'air.
- Vérifier que les déperditions par transmission du logement sont inférieures aux déperditions de référence.
- Calculer éventuellement les déperditions de base qui expriment les besoins de chauffage.

a) Expressions générales des déperditions :

Déperditions totales :

$$D = \Sigma\, Di \qquad [W/°C]$$

* Di [W/°C] représente les déperditions totales du volume « i ».

- Déperditions totales d'un volume :

$$Di = (D_T)i + (D_R)i \qquad [W/°C]$$

* (DT) i [W/°C] représente les déperditions par transmission du volume i.

* (DR) i [W/°C] représente les déperditions par renouvellement d'air du volume i.

Déperditions par transmission :

$$(D_T)i = (D_s)i + (D_{li})i + (D_{sol})i + (D_{lnc})i$$

* (Ds) i [W/°C] représente les déperditions surfaciques à travers les parties courantes des parois en contact avec l'extérieur.

* (Dli) i [W/°C] représente les déperditions à travers les liaisons.

* (Dsol) i [W/°C] représente les déperditions à travers les parois en contact avec le sol.

* (Dlnc) i [W/°C] représente les déperditions à travers les parois en contact avec les locaux non chauffés.

- Déperditions par renouvellement d'air :

$$(D_R)i = (D_{Rv})i + (D_{Rs})i$$

* (DRv) i [W/°C] représente les déperditions dues au fonctionnement normal des dispositifs de ventilation.

* (DRs) i [W/°C] représente les déperditions supplémentaires dues au vent.

b) Déperditions de référence :

Les déperditions par transmission DT doivent être confirmées par : DTR C3-2

$$D_T \leq 1{,}05 \times D_{réf} \qquad [W/°C]$$

* Dréf [W/°C] représente les déperditions de référence.

<u>- Calcul des déperditions de référence :</u>

$$D_{réf} = a \times S1 + b \times S2 + c \times S3 + d \times S4 + e \times S5$$

- Les Si [m²] représentent les surfaces des parois en contact avec l'extérieur.

Le tableau 4.1 indique les coefficients de transfert thermique de référence à prendre pour différentes zones climatiques et pour les surfaces suivantes : S1 la toiture, S2 le plancher bas, y compris les planchers bas sur locaux non chauffés, S3 les murs, S4 les portes, S5 les fenêtres et les portes-fenêtres. S1, S2, S3 sont comptées de l'intérieur des locaux, S4 et S5 sont comptées en prenant les dimensions du pourtour de l'ouverture dans le mur.

Tableau : 4.1 Coefficients *de référence*

Zone	Logement individuel					Logement en immeuble collectif				
	a	b	c	d	e	a	b	c	d	e
A	1.10	2.40	1.40	3.50	4.50	1.10	2.40	1.20	3.50	4.50
B	1.10	2.40	1.20	3.50	4.50	0.90	2.40	1.20	3.50	4.50
B'	1.10	2.40	1.20	3.50	4.50	0.90	2.40	1.20	3.50	4.50
C	1.10	2.40	1.40	3.50	4.50	0.85	2.40	1.20	3.50	4.50
D	2.40	3.40	1.40	3.50	4.50	2.40	3.40	1.40	3.50	4.50
D'	2.40	3.40	1.40	3.50	4.50	2.40	3.40	1.40	3.50	4.50

Les zones climatiques considérées dans le DTR sont les suivantes :

La zone A comprend le rivage de la mer et parfois le versant Nord des chaînes côtières.

La zone B comprend la plaine derrière le rivage de la mer et les vallées entre les chaînes côtières et l'atlas tellien ; au sein de cette zone, on distingue une sous-zone B'

La zone C comprend les Hauts-Plateaux compris entre l'atlas tellien et l'atlas Saharien.

La zone D comprend le Sahara, au sein de laquelle on distingue une sous-zone D.

Le découpage administratif est celui en vigueur en Avril 1998 (voir annexe 1 du DTR).

4.6. Exercices :

Exercice 01 :

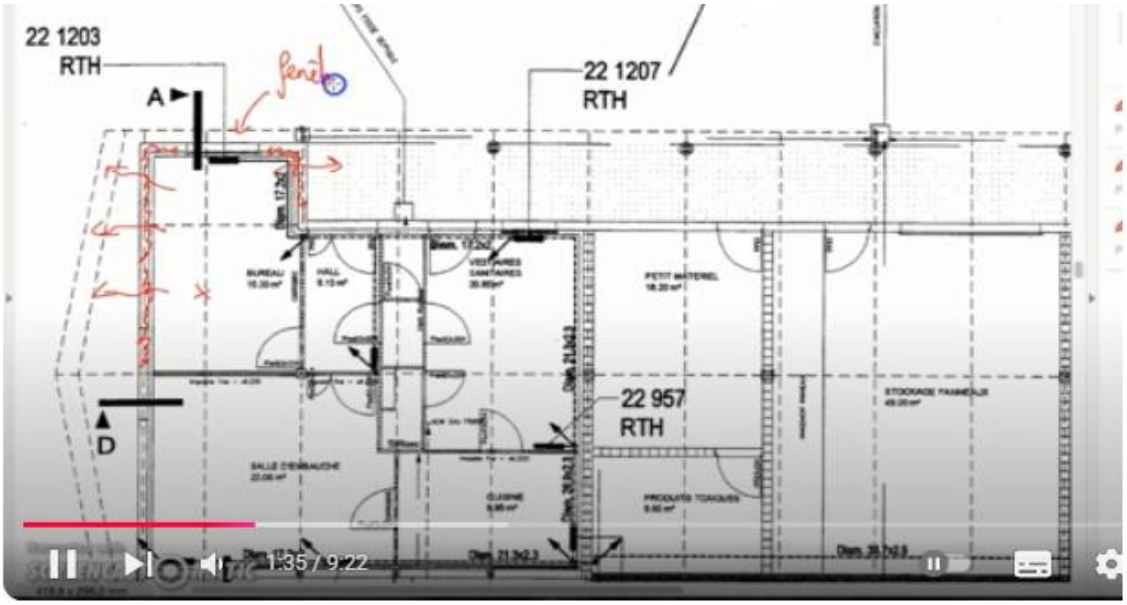
On demande de calculer les déperditions thermiques du bureau représenté dans le plan ci-dessous, en complétant le tableau 1 :

On donne : les murs U = 0.35 W /m^2 k

Les ouvrants (fenêtre) U = 3.10 W /m^2 k

Le coefficient linéique pour les ouvrants Ψ = 0.23 W /m k

Taux = 2 fois /h



Désignation	Surface nette m2	Coef de transmission	**ΔT**	Calculs
ouvrant	2.25		20	
murs	31.38			
L ouvrant	6.00 m			
Volume habitable	6.43 m3			
Déperditions totales				

Exercice 02 :

Données

- **Dimensions de la maison** : Longueur = 10 m, Largeur = 8 m, Hauteur = 3 m.
- **Murs** : Murs en béton de 20 cm d'épaisseur, coefficient de transmission thermique (U) = 0,3 W/m²K.
- **Toit** : Toit isolé avec un U = 0,25 W/m²K.
- **Fenêtres** : Double vitrage, surface totale de 10 m², U = 1,5 W/m²K.
- **Porte** : Surface de 2 m², U = 3 W/m²K.
- **Température intérieure souhaitée** : 20°C.
- **Température extérieure moyenne en hiver** : 0°C.

Questions :

1. Calculez la surface de chaque composant (murs, toit, fenêtres, porte).
2. Calculez les déperditions thermiques pour chaque composant.
3. Déterminez les déperditions thermiques totales de la maison.
4. Proposez des mesures pour réduire ces déperditions.

CHAPITRE 5 :
ISOLATION THERMIQUE

5.1. Introduction

L'isolation thermique permet à la fois de réduire les consommations d'énergie de chauffage et /ou de climatisation et d'accroître le confort. Mais ce n'est pas tout : l'isolation est également bénéfique pour l'environnement car, en réduisant les consommations, elle permet de préserver les ressources énergétiques et de limiter les émissions de gaz à effet de serre. Ainsi, l'isolation thermique est intéressante en termes de protection de l'environnement, de confort et d'économies financières.

5.2 L'intérêt de l'isolation thermique

L'isolation dans une habitation est un point essentiel de la thermique d'une maison. Elle permet de diminuer les échanges de chaleur entre l'intérieur du bâtiment et l'environnement extérieur, et ainsi diminuer les besoins de chauffage et de climatisation. Cette isolation doit être pensée en fonction des contraintes climatiques du lieu où se situe le bâtiment. L'isolation thermique est le principe de base de la maison passive. Elle emprisonne la chaleur à l'intérieur en hiver et garde la maison fraîche en été.

La lutte contre le gaspillage d'énergie passe par l'isolation thermique des bâtiments chauffés, elle fait l'objet d'une réglementation précise datant de plus d'une trentaine d'années. L'isolation des nouveaux logements est obligatoire mais c'est aussi un moyen efficace de réduire les dépenses de chauffage et de climatisation.

la répartition des pertes de l'énergie dans les maisons non isolées thermiquement est illustrée dans la figure 4.1.

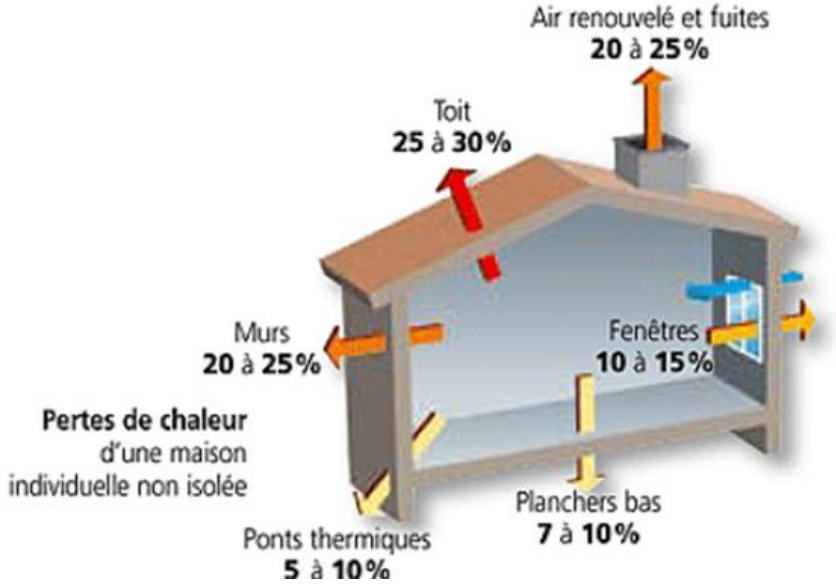


Figure 5.1 : la répartition des pertes de l'énergie dans les maisons non isolées

L'isolation thermique d'un logement consiste à :

- Maintenir une température intérieure agréable toute l'année en limitant les déperditions thermiques l'hiver et les apports de chaleur l'été.

-Réduire la consommation énergétique de chauffage, voire de climatisation, pour diminuer le montant de la facture d'énergie

- Emettre moins de gaz à effet de serre du fait d'une consommation réduite d'énergie .

L'isolation thermique doit se faire au niveau de :

- Murs : elle consiste à recouvrir les murs de la maison (sur la surface intérieure ou extérieure) de matière isolante.

-Toitures :

A- toiture chaude : l'isolant est posé sur le toit, protégé par une membrane d'étanchéité ou à isolation inversée quand l'isolant est placé au-dessus de la membrane d'étanchéité.

B - la toiture froide : cette isolation est réalisée par l'intérieur de l'habitation, en plafond des pièces du dernier étage.

- Plancher

- Ouvertures : Portes et fenêtres. Dans une maison, il est recommandé de remplacer les fenêtres simples vitrages par du double vitrage, avec la pose de volets quand il n'y en a pas ils offrent un complément d'isolation l'hiver et protègent les individus du soleil l'été.

- combles plafonds :

A -Pour les combles perdus accessibles **:** l'isolation se présente fréquemment sous forme de rouleaux avec un large choix de matériaux tels que la laine de verre, la laine de roche. La pose de ces rouleaux peut se faire rapidement.

B- Pour les combles perdus inaccessibles ou difficilement accessibles : l'isolation par soufflage est alors possible

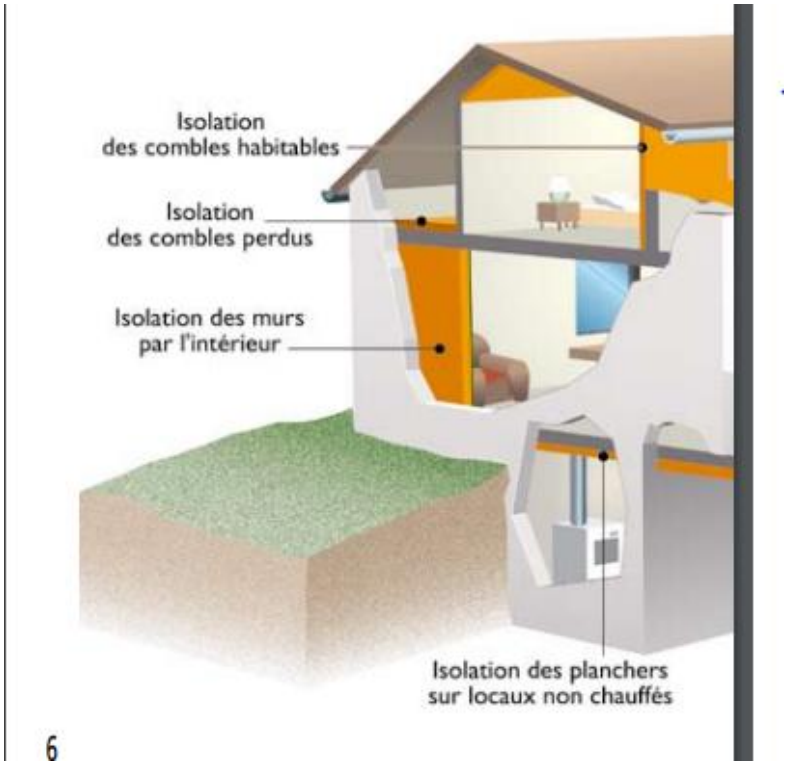


Figure 5.2 : isolation des éléments d'une habitation

5.3. Les Matériaux isolants :

Pour choisir un produit isolant ou d'isolation, on prendra en compte sa résistance thermique R qui figure sur l'étiquette du produit. Plus R est important, plus le produit est isolant.

Les matériaux isolants sont des matériaux poreux qui comportent des espaces d'air non ventilés (ou autre gaz) en leur sein.

5. 3.1. Qualité des isolants thermiques

En fonction des besoins des individus , de la configuration du logement, de l'endroit , de la paroi à isoler… le **meilleur isolant** est celui qui apporte le meilleur confort (thermique et/ou acoustique) et permet de réaliser des économies d'énergie. Pour qu'un isolant soit performant, il y a différents critères à prendre en compte :

- Capacité à résister aux variations de température
- Résistance au feu ;
-Résistance mécanique (traction et compression) ; Étanchéité à l'air ;
-Résistance à la diffusion de vapeur d'eau ;
-Faible absorption d'eau par immersion, par flottaison et par diffusion ; Stabilité dimensionnelle et comportement à la chaleur.
-Qualités acoustiques ; Prix.

- facilité de pose, bien qu'il soit toujours préférable de passer par un professionnel .

5.4. Optimisation de l'isolation

5.4 .1. Optimisation de la conductivité

L'air étant un très bon isolant, on essaiera autant que possible d'enfermer des volumes d'air qui serviront d'isolants.

C'est le principe de beaucoup d'isolants classiques comme la laine de verre qui est en grande partie isolante grâce à l'air qu'elle emprisonne.

Le choix des matériaux pour la construction et pour les isolants est très important.

Remarque : En complément de la résistance thermique certains isolants intègrent une feuille métallisée pour bloquer les déperditions de chaleur par rayonnement.

5.4.2. Optimisation de l'épaisseur

D'un point de vue thermique, il est intéressant d'augmenter l'épaisseur des isolants.

Techniquement une forte épaisseur d'isolant peut être difficile à installer en particulier dans le cas d'une rénovation.

En effet, une forte épaisseur isolant sur l'intérieur vient diminuer l'espace habitable et en extérieur et peut conduire à des modifications lourdes (ossature, charpente, toiture, …).

5.4.3. Optimisation de la surface d'échange

Pour améliorer l'isolation d'un bâtiment, il faut tant que possible réduire sa surface d'échange avec l'extérieur.

La surface d'échange thermique avec l'extérieure dépend très sensiblement de la forme du bâtiment. De manière générale plus un bâtiment sera « ramassé » plus sa surface d'échange sera réduite.

5.5. Classification des matériels isolants :

5.5.1 Produits minéraux

On cite : la laine de verre, la laine de roche, argile expansé ….

La laine de verre :est élaborée à partir de sable et de verre recyclé ou calcin, par fusion et fibrage , disponible en rouleaux, panneaux ou flocons .

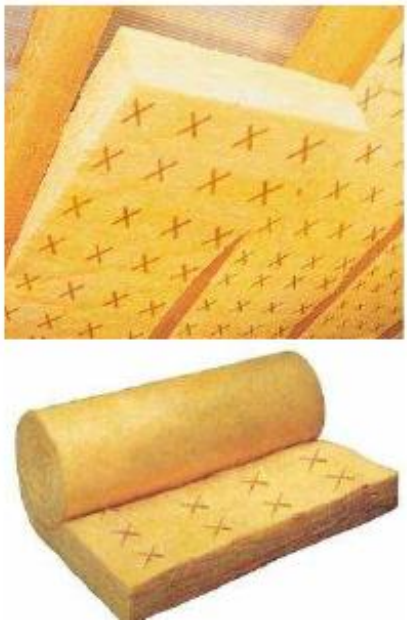


Figure 5.3 : la laine de verre

a -Caractéristiques techniques

Densité : 13 à 100kg/m3

Conductivité thermique : 0.039 W/m.°C

Capacité thermique (S): 14 à 104 kJ/m3.°C

Classement au feu : M1

Coefficient de résistance à la vapeur d'eau : 1 à 4

Energie grise : 225 kWh/m3

b- Avantages de la laine de verre

- cout

- performances thermique

c- Inconvénients

Dégradations mécanique (humidité)

Protection très limitée incendie

Bilan CO2 : 75 kg éq. CO2 /

d - réalisation de l'isolation

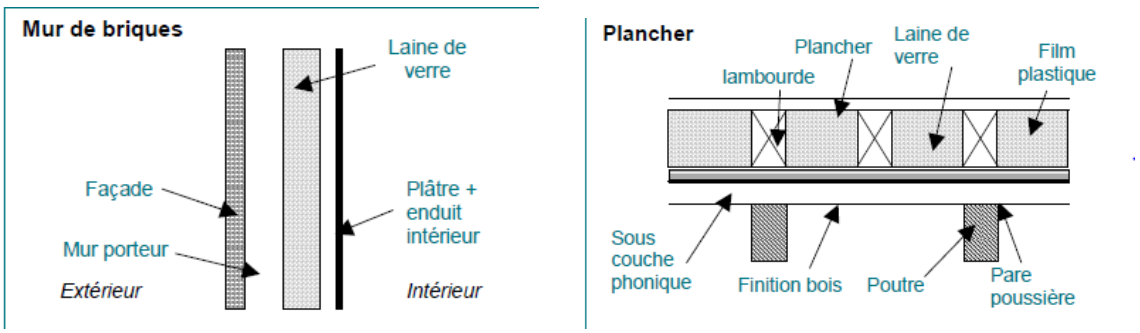


Figure 5.4 : réalisation de l'isolation

5.5.2 produits naturels

- le coton : La laine de coton en isolation se distingue par sa capacité à stocker et à réguler la chaleur sans s'échauffer (faible effusivité).

Figure 5.5 : le coton

A Avantages

Très bonne capacité à absorber la vapeur d'eau sans nuire à sa capacité d'isolation

Mise en place possible sans freine vapeur (si la paroi extérieur est suffisamment perméable)

Renouvelable et recyclable

pas de dégagement toxique en cas d'incendie

Bonne isolation phonique

b- Inconvénients

Utilisation de pesticides pour la culture

Beaucoup de poussière lors de la mise en œuvre (port d'un masque fortement **r**ecommandé)

c- réalisation de l'isolation

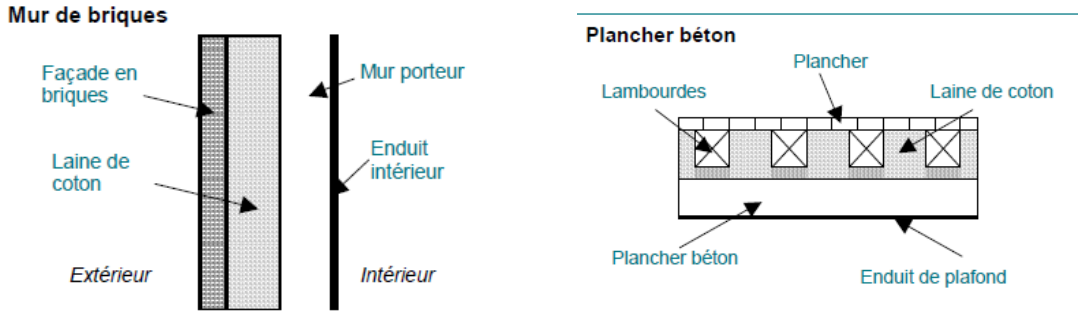


Figure 5.6 :réalisation de l'isolation

5.5.3. produits synthétiques

polystyrène éxpansée : panneaux d'isolation obtenus à partir de résine de polystyrène facilement façonnable. Il est obtenu par transformation de la résine en blocs de mousse. Comme il est également efficace pour l'isolation acoustique, on constate qu'il est privilégié pour l'isolation thermique intérieure et extérieure

Figure 5.7 : Polystyrène

a. caractéristiques techniques

Conductivité thermique moyenne: 0,040 W/m.K

Densité: de 10 à 40 kg/m3

Capacité thermique: 1,1 kJ/kg. polystyrène

Classement au feu: M1

Coefficient de résistance à la vapeur d'eau μ : 1

Énergie grise: 450 kWh/m3

Bilan CO2 : 70 kg éq. CO2 / m

a- Avantages

Pose facile

Bonne capacité d'isolation

Bonne perméabilité à la vapeur d'eau ; très léger

Très bonne résistance à la compression; facile à travailler ; économique.

b- Inconvénients

Isolation acoustique médiocre ; mode de fabrication polluant

Dégagement de gaz toxiques en cas d'incendie

Déconseillé sur les surfaces irrégulières ; facilement inflammable

Doit être associé à un revêtement ignifugé.

c- réalisation de l'isolation

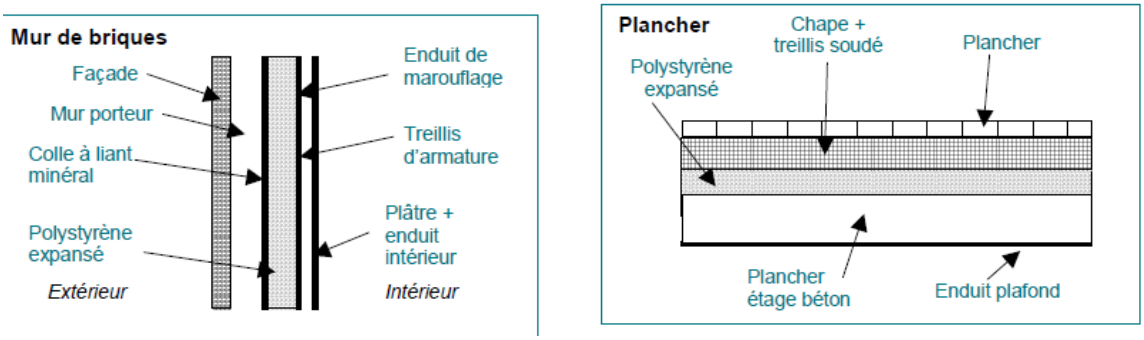


Figure 5.8 : réalisation de l'isolation

Le tableau 5.2 résume les caractéristiques des différents isolants

Tableau 5.2 : caractéristiques des différents isolants

	Isolants minéraux	Isolants synthétiques	Isolants biosourcés
Origine	Ressources minérales	Pétrole	Ressources végétales et animales
Performance thermique (en W/m.k)	De 0,030 à 0,10	De 0,018 à 0,046	De 0,035 à 0,048
Performance phonique	Bonne	Mauvaise	Bonne
Prix	À partir de 3€/m2 pour des rouleaux d'une épaisseur de 100 mm.	À partir de 4€/m2 pour des panneaux d'une épaisseur de 40mm.	À partir de 11€/m2 pour des panneaux d'une épaisseur 10 cm.
Perméable à l'eau	Oui	Non	Oui
Sensible au feu	Non	Oui	Oui
Imputrescible	Oui	Oui	Variable
Stabilité dans le temps	Variable	Excellente	Variable
Dangers pour la santé	Caractère irritant qui nécessite une protection pendant la pose.	Émanation de gaz toxiques possibles.	Pas de dangers avérés aujourd'hui.
Recyclable	Difficilement	Non	Oui

- Références

Chapitre 1 : généralités

Adrien Verschaere / 2016 : https://jeretiens.net/les-3-transferts-thermiques/aturel , Architectural et Construit

M. Jedidi., O. Benjeddou (2016) « La thermique du bâtiment du confort thermique au choix des équipements de chauffage et de climatisation » Dunod, Paris. www.dunod.com . ISBN 978-2-10-074343-8.

N. Morel et E. Gnansounou (2008) (nouvelle édition du cours précédemment donné par Claude-Alain Roulet et Arnaud Dauriat) **«** Énergétique Du Bâtiment **»** Section de Génie Civil, 4ème/5ème année, École Polytechnique Fédérale De Lausanne, Faculté D'environnement

R.Kharchi, « Etude énergétique de Chauffage, Rafraîchissement et Eau Chaude Sanitaire d'une Maison Type en Algérie », thèse de doctorat (juillet 2013).

Chapitre 2 : Tansferts thermiques

Assia AIDOUD Thermique de bâtiment Cours & exercices 2020.université de Guelma

J. Brau, (2006), « Cours conduction au département Génie Civile et Urbanisme », INSA -- Lyon. Désponible sur : http://docinsa.insa-lyon.fr/polycop/download.php?id=160504&id2=0 consulté (2019)

https://www.maxicours.com/se/cours/transferts-thermiques-flux-thermique-resistance-thermique/

https://brainboxai.com/fr/articles/l-efficacite-energetique-des-batiments-iue-et-consommation-d-energie

Fiche Calcul, « Calcul des charges thermiques », version 001-2013, Thermique du bâtiment p.6 disponible sur : https://fr.scribd.com/document/375842041/thermique-du-batiment-pdf consulté (2018).

Moufok Mostefa Thermique de bâtiment Cours & exercices 2020.université de Djelfa

-01_DR_thermique_bat_prof_ED.odt

Chapitre 3: Confort thermique

N. Morel et E. Gnansounou (2008) (nouvelle édition du cours donné par Claude-Alain Roulet et Arnaud Dauriat) **«** Énergétique Du Bâtiment **»** École Polytechnique Fédérale De Lausanne, Faculté D'environnement Naturel, Architectural et Construit.

Confort thermique – généralité, Disponible sur **:**

https://energiepluslesite.be/theories/confort11/le-confort-thermique-d1/ consulté (2019)

https://conseils-thermiques.org/contenu/confort-thermique.php

https://www.precarite-energie.org/IMG/pdf/3.fiche_sante_confort_thermique.pdf

https://gregbill.synology.me/wpcontent/uploads/Ingenierie_systeme/Complements/3Presentation_ANAH_CONFORT_THERMIQUE.pdf

Chapitre 4: Déperditions thermiques

Antoine. Déperditions thermiques : de quoi s'agit-il et quelles sont les solutions

Document technique règlementaire **DTR C3-2**

https://particulier.hellio.com/blog/conseils/deperdition-thermique 2025

https://www.youtube.com/watch?v=TpgorzQi1dA

Chapitre5 : Isolation thermique

EDF guide isolation

http://www.techmania.fr/Ademe_fiches/isolation.pdf

http://doctechno.free.fr/IMG/pdf/EDF_Guide_isolation_thermique.pdf

https://particuliers.engie.fr/economies-energie/conseils-economies-energie/conseils-travaux-renovation/isolants.html