

I) Confort thermique

I-1) Définition

La **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). La connaissance et la maîtrise de ces transferts thermiques permet une gestion de la facture énergétique d'un bâtiment. La diminution de ces échanges thermiques permet de maintenir une température tempérée à l'intérieur du bâtiment en y apportant le moins d'énergie possible. Elle permet également d'orienter la **conception** du bâtiment dans un cadre réglementaire tout en visant un compromis entre coût énergétique et confort.

Une étude complète nécessite de distinguer les sources de chaleur internes et externes au bâtiment, c'est-à-dire les parties actives, des parties passives comme les surfaces extérieures, les vitres, la toiture par exemple.

I-2) Notions physiques et énergétiques

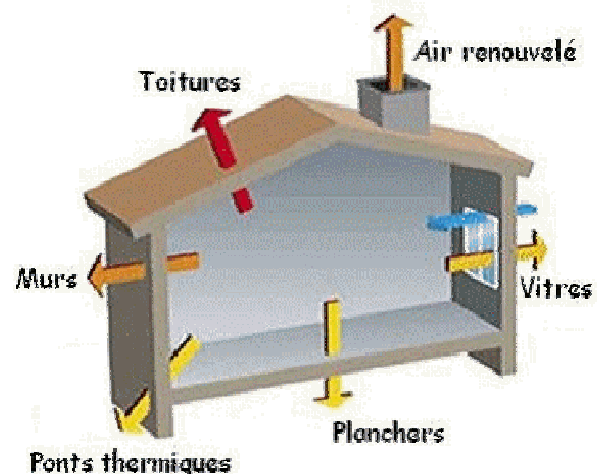
I-2-1) Déperdition thermique

Un échange de chaleur se produit entre deux milieux lorsqu'il existe une différence de température entre ces deux milieux. La chaleur se propage d'un milieu chaud vers le milieu froid par :

- conduction ;
- convection ;
- rayonnement ;

L'**enveloppe thermique** d'un bâtiment est la surface qui sépare le volume intérieur chauffé du bâtiment de l'environnement extérieur. Elle est définie par les parois extérieures du bâtiment. C'est autour de cette enveloppe qu'opèrent les échanges de chaleur, appelés aussi **transferts thermiques**, qui influenceront sur les besoins de chauffage ou de rafraîchissement du bâtiment.

De manière générale, depuis le milieu intérieur, les calories atteignent les parois extérieures par **convection** et **rayonnement**, passent au travers de celle-ci par **conduction**, et s'échappent à nouveau par convection et rayonnement.



Le but de l'isolation thermique est donc de diminuer les échanges de chaleur entre l'intérieur et l'extérieur par interposition d'un matériau ayant la **capacité de conduction** la plus faible possible. L'isolation thermique peut avoir pour but de garder la chaleur présente dans le bâtiment en hiver, ou d'éviter le réchauffement pendant l'été.

Par parois on observe:

Pour les murs :

- Conduction : le mur transmet la chaleur par conduction dans son épaisseur entre l'intérieur et l'extérieur du bâtiment.
- Convection : le vent accélère l'échange thermique à la surface extérieure du mur par convection.
- Rayonnement : le Soleil chauffe le mur par rayonnement. Le mur chaud rayonne aussi la nuit vers le ciel.

Pour les fenêtres :

- Conduction : la vitre transmet la chaleur par conduction dans son épaisseur entre l'intérieur et l'extérieur du bâtiment.
- Convection : le vent refroidit la vitre par convection.
- Rayonnement : le Soleil chauffe l'intérieur de la pièce à travers la surface transparente. L'intérieur de la pièce lui-même perd une partie de son énergie par rayonnement vers l'extérieur. Mais la vitre bloque une grande partie du rayonnement infrarouge émis (principe de l'effet de serre).

Pour la toiture :

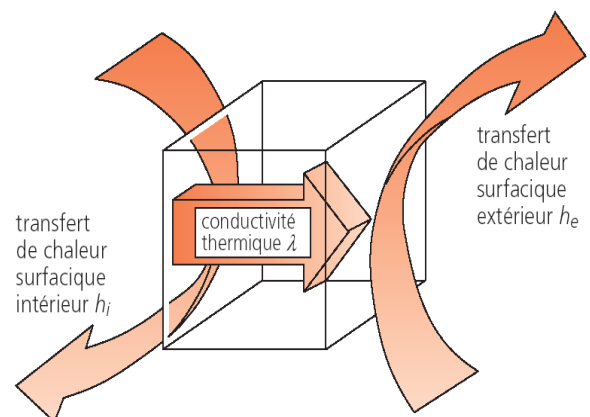
- Rayonnement : le Soleil réchauffe le toit par rayonnement.
- Conduction : la chaleur du Soleil est transmise à travers le toit au reste du bâtiment.
- Convection : le vent refroidit le toit avec un vent frais.

Pour le plancher :

- Conduction : la chaleur est échangée entre le bâtiment et le sol à travers l'épaisseur de la dalle.
- Convection : les échanges convectifs n'interviennent que si la dalle est située sur un vide sanitaire ventilé. Il n'y a pas d'échange par rayonnement.

I-2-2) La Conduction

C'est le mode de transfert qui apparaît toujours dans un fluide ou un solide dès qu'il y a un gradient de température. Il s'agit d'un transfert thermique de proche en proche par chocs microscopiques entre particules d'énergie différente, les particules les plus énergétiques transmettant de l'énergie cinétique à celles qui en ont moins. D'un point de vue phénoménologique elle est décrite par la loi de Fourier.



I-2-3) La Convection

Ce mode de transfert est spécifique aux fluides. En plus du transfert de chaleur par conduction toujours présent dans la matière, il y a dans les fluides un transfert de chaleur provoqué par l'écoulement du fluide, c'est à dire par le mouvement d'ensemble des particules qui le composent. On classe généralement la convection en deux catégories :

I-2-3-1) La convection naturelle

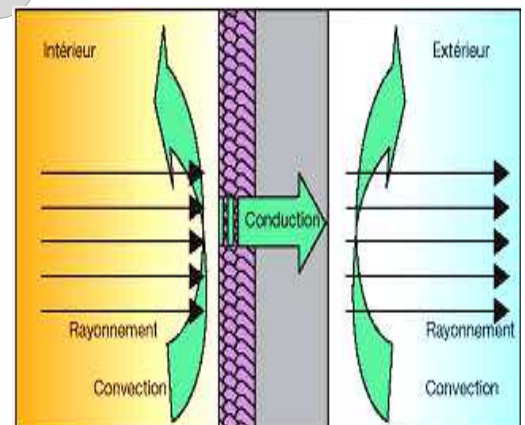
Il y a convection naturelle lorsque le mouvement du fluide est uniquement dû à la poussée d'Archimède induite par les variations de masse volumique au sein du fluide, lesquelles sont la conséquence des variations spatiales de température. L'air chaud, plus léger, tend alors à monter, alors que l'air froid descend. Ce mécanisme se produit dans des situations très diverses : il est responsable de l'homogénéisation de la température dans une pièce d'habitation (transfert de chaleur du radiateur vers les parties froides de la pièce), mais également des courants marins ainsi que de la circulation générale de l'atmosphère terrestre.

I-2-3-2) La convection forcée

Dans la convection forcée, le fluide doit son mouvement à une cause extérieure (pompe, ventilateur, agitateur, etc.). En convection forcée proprement dite, la poussée d'Archimède est négligeable devant les forces servant à mettre le fluide en mouvement. C'est le cas, par exemple, du refroidissement des moteurs à combustion interne : la pompe à eau pousse le liquide de refroidissement à travers le moteur, puis dans l'échangeur.

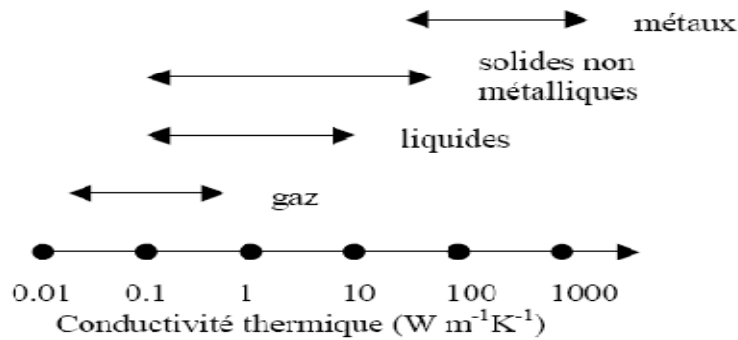
I-2-4) Le Rayonnement

Dans une certaine gamme de longueurs d'ondes, l'émission d'une onde électromagnétique s'accompagne d'une baisse de l'énergie interne du système, alors que l'absorption provoque une augmentation de cette dernière. On parle alors d'échanges de chaleur par rayonnement thermique, ou de transferts radiatifs. En effet, lorsque deux surfaces sont mises en regard, et séparées par un milieu transparent (le vide ou de l'air), chacune émet un flux radiatif, dont une partie est absorbée par l'autre. Le flux émis étant proportionnel à la puissance 4 de la température absolue, la surface à température la plus élevée émet plus d'énergie qu'elle n'en absorbe, alors que c'est l'inverse pour la surface froide. Il y a par ce moyen transfert de chaleur de la surface chaude vers la surface froide.



I-2-5) Conductivité thermique.

Tous les matériaux n'isolent pas aussi bien. Pour comparer les matériaux, on a introduit la notion de coefficient de conduction de la chaleur: le coefficient de conductivité thermique (λ) d'un matériau est la quantité de chaleur qui traverse, par unité de temps, une surface murale de 1m² et de 1 m d'épaisseur, lorsque la différence de température entre les deux surfaces est de 1 °C. λ est d'autant plus élevé que le matériau est humide (cf. tableau).



I-2-6) Résistance thermique

La résistance thermique est utilisée pour quantifier le pouvoir isolant des matériaux pour une épaisseur donnée. Elle s'exprime en m².C°/W. Une paroi est d'autant plus isolante que sa résistance thermique est élevée.

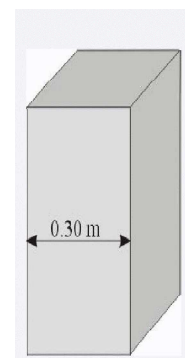
C'est le rapport entre l'épaisseur du matériau et le coefficient de conductivité thermique ($R = e/\lambda$). Plus le R est élevé, plus le matériau ou la paroi est isolante. On l'exprime en (m².C°)/W.

La résistance R que le matériau offre au passage de la chaleur est inversement proportionnelle à la conduction de la chaleur et directement proportionnelle à l'épaisseur, donc :

$$R = \frac{e}{\lambda} \quad \left(\frac{\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C}}{\text{W}} \right)$$

Avec R = résistance thermique (m².C° /W)
 e = épaisseur de l'isolant (m)
 λ = conductivité thermique (W/m.C°)

$$R = \frac{e}{\lambda} = \frac{0.30}{1.15} = 0.26 \quad \text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C} / \text{W}$$



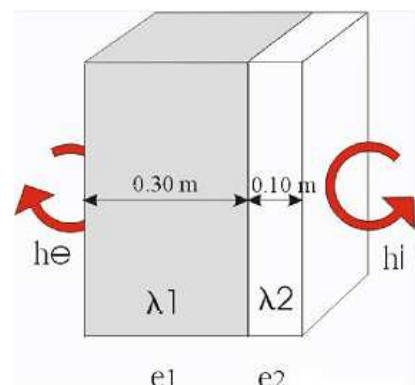
$\lambda=1.15$

Deux cas sont à considérer. Lorsque les éléments sont en :

a)- en série

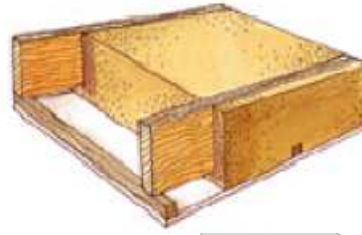
Pour un mur composé de plusieurs matériaux. La résistance thermique globale est la somme des résistances des différentes épaisseurs à laquelle s'ajoute les résistances d'échanges superficielles internes et externes $\frac{1}{h_i}$ et $\frac{1}{h_e}$ (les coefficients h_i et h_e étant dus à la convection respectivement interne et externe. C'est-à-dire de part et d'autre de la paroi)

$$R = 1/h_i + 1/h_e + \sum e/\lambda$$



a)- en parallèle

$$\frac{1}{R_{Totale}} = \sum \frac{1}{R_i}$$



I-2-7) Transmission calorifique (conductance thermique)

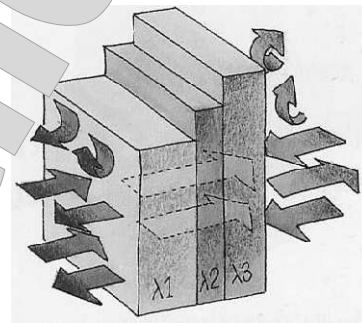
Pour caractériser une paroi, on utilise l'inverse de R, c'est-à-dire U, le Coefficient de transfert thermique (anciennement appelé k). Il s'exprime en **W/m².C°**. Il représente le flux de chaleur à travers **1m²** de paroi pour une différence de température de **1°C** entre les deux environnements séparés par la paroi. Plus **U** est faible, plus la paroi est isolante.

On peut écrire pour :

- Les Matériaux disposés en « série »
(On ajoute les résistances)

$$R_{totale} = \sum R_i$$

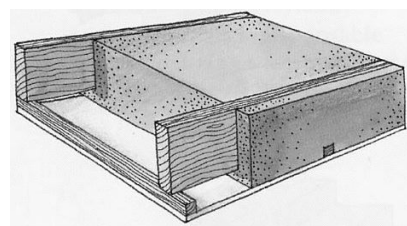
$$\frac{1}{U_{Totale}} = \sum \frac{1}{U_i}$$



- Matériaux disposés en « parallèle »
(On ajoute les conductances)

$$U_{totale} = \sum U_i$$

$$\frac{1}{R_{Totale}} = \sum \frac{1}{R_i}$$



I-2-8) Coefficients de transfert de chaleur surfacique h

La transmission de chaleur entre l'air intérieur et l'élément est indiquée par le coefficient de transfert de chaleur surfacique h_i (anciennement α_i); celle qui a lieu entre l'élément et l'air extérieur, par le coefficient de transfert de chaleur surfacique h_e (anciennement α_e).

- **Transmission de chaleur entre l'air intérieur et l'élément.**

Ce processus est décrit par le coefficient de transfert de chaleur surfacique intérieur h_i

- **Conduction de chaleur à l'intérieur d'un élément.**

Le paramètre déterminant est ici la conductivité thermique λ (lambda) des différents matériaux

- **Transmission de chaleur entre l'élément et l'air extérieur.**

Ce processus est décrit par le coefficient de transfert de chaleur surfacique extérieur h_e

I-2-9) La résistance thermique superficielle R_s

La résistance thermique superficielle R_s est l'inverse du coefficient de transfert de chaleur surfacique h . On applique les valeurs suivantes :

$$R_{si} = \frac{1}{h_i} = 0.13 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W} \quad h_i = 8 \text{ W/(m}^2 \cdot \text{K)}$$

$$R_{se} = \frac{1}{h_e} = 0.04 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W} \quad h_e = 25 \text{ W/(m}^2 \cdot \text{K)}$$

pour les parties en contact avec le sol:

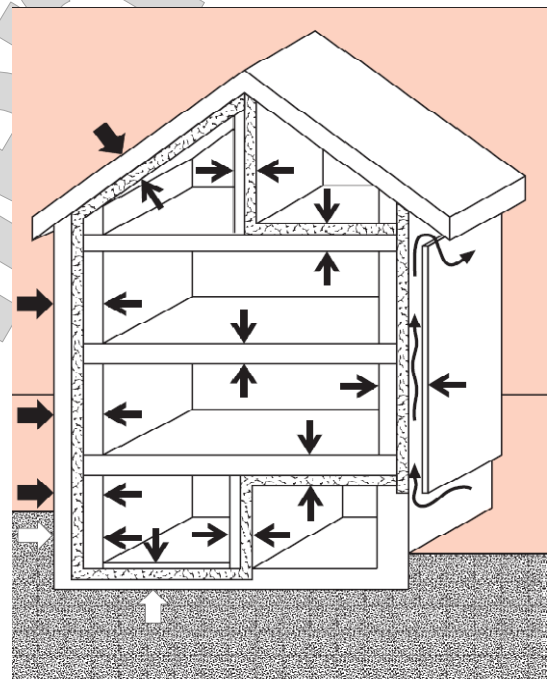
$$R_{se} = \frac{1}{h_e} = 0 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$$

➡ $R_{se} = 0.04 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$

➡ $R_{si} = 0.13 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$

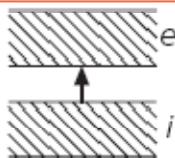
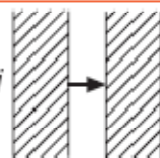
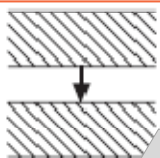
➡ $R_{se} = 0 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$

~> Circulation d'air



I-2-10) Résistance thermique R_g des lames d'air

Dans le calcul de la valeur U , les lames d'air confinées dans les espaces vides constituent un cas particulier. Une lame d'air est dite confinée, lorsque l'espace vide est séparé de l'espace environnant. Dans la pratique, les propriétés isolantes sont définies à l'aide de la résistance thermique R_{lam} d'air en $\text{m}^2 \cdot \text{K/W}$ (tabl.). Dans la formule qui sert à calculer la valeur U , on peut directement remplacer le rapport (e/λ) correspondant à la lame d'air par la valeur R_{lam} d'air correspondante.

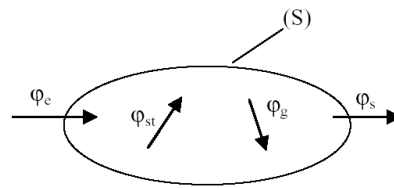
Epaisseur de la lame d'air en mm	Direction du flux thermique		
	ascendant	horizontal	descendant
			
5	0.11	0.11	0.11
10	0.15	0.15	0.15
25	0.16	0.18	0.19
50	0.16	0.18	0.19
100	0.16	0.18	0.19

Les valeurs intermédiaires peuvent être interpolées.

I-3) Formulation d'un problème de transfert de chaleur

I-3-1) Bilan d'énergie

Il faut tout d'abord définir un système (S) par ses limites dans l'espace et il faut ensuite établir l'inventaire des différents flux de chaleur qui influent sur l'état du système et qui peuvent être :



Avec :

φ_{st}	Flux de chaleur stocké
φ_g	Flux de chaleur généré
φ_e	Flux de chaleur entrant
φ_s	Flux de chaleur sortant

On applique alors le 1er principe de la thermodynamique pour établir le bilan d'énergie du système (S):

$$\varphi_e + \varphi_g = \varphi_s + \varphi_{st}$$

I-3-2) Expression des flux d'énergie

Il faut ensuite établir les expressions des différents flux d'énergie. En reportant ces expressions dans le bilan d'énergie, on obtient l'équation différentielle dont la résolution permet de connaître l'évolution de la température en chaque point du système.

I-3-2-1) Conduction

C'est le transfert de chaleur au sein d'un milieu opaque, sans déplacement de matière, sous l'influence d'une différence de température. La propagation de la chaleur par conduction à l'intérieur d'un corps s'effectue selon deux mécanismes distincts : une transmission par les vibrations des atomes ou molécules et une transmission par les électrons libres.

La théorie de la conduction repose sur l'hypothèse de Fourier : Le flux est proportionnel au gradient de température :

$$\Phi(W) = \frac{dQ}{dt} = -\lambda \cdot S \cdot \frac{dT}{dx}$$

Ainsi que sa densité :

$$\varphi = \frac{\Phi}{S} = -\lambda \cdot \frac{dT}{dx}$$

Avec :

Φ	Flux de chaleur transmis par conduction	(W)
λ	Conductivité thermique du milieu	(W m ⁻¹ °C ⁻¹)
x	Variable d'espace dans la direction du flux	(m)
S	Aire de la section de passage du flux de chaleur	(m ²)

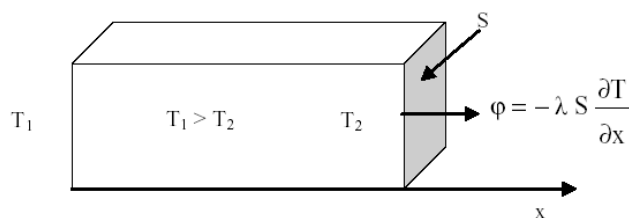


Schéma du transfert de chaleur conductif

On trouvera dans le tableau 1.1 les valeurs de la conductivité thermique λ de certains matériaux parmi les plus courants.

Tableau 1.1 : Conductivité thermique de certains matériaux

Matériau	λ (W.m ⁻¹ . °C ⁻¹)	Matériau	λ (W.m ⁻¹ . °C ⁻¹)
Argent	419	Plâtre	0,48
Cuivre	386	Amiante	0,16
Aluminium	204	Bois (feuillu-résineux)	0,12-0,23
Acier doux	45	Liège	0,044-0,049
Acier inox	15	Laine de roche	0,038-0,041
Glace	1,88	Laine de verre	0,035-0,051
Béton	1,4	Polystyrène expansé	0,036-0,047
Brique terre cuite	1,1	Polyuréthane (mousse)	0,030-0,045
Verre	1,0	Polystyrène extrudé	0,028
Eau	0,60	Air	0,026

D'une manière plus simple, on peut exprimer la densité de ce flux qui sera proportionnelle à la différence de températures et inversement proportionnelle à la résistance thermique de la paroi.

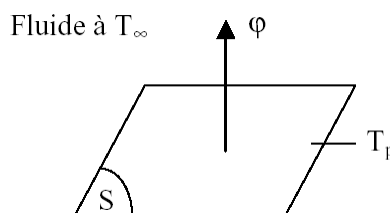
$$\varphi = \frac{\Phi}{S} = \frac{T_1 - T_2}{R} \quad \left(\frac{W}{m^2}\right)$$

avec S : surface de la paroi (m²) R : résistance totale de la paroi

I-3-2-2) Convection

C'est le transfert de chaleur entre un solide et un fluide, l'énergie étant transmise par déplacement du fluide. Ce mécanisme de transfert est régi par la loi de Newton :

$$\Phi(W) = h.S.(T_s - T_a)$$



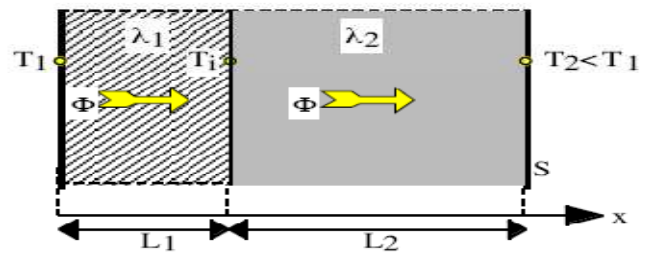
Avec :

Φ	Flux de chaleur transmis par convection	(W)
h	Coefficient de transfert de chaleur par convection	(W m ⁻² °C ⁻¹)
T_s	Température de surface du solide	(°C)
T_a	Température du fluide loin de la surface du solide	(°C)
S	Aire de la surface de contact solide/fluide	(m ²)

Deux cas pour calculer le Flux de chaleur ϕ

1- les corps placés en série

Considérons plusieurs corps de résistances Thermiques R_{T1}, R_{T2}, \dots etc



$$\Phi = \frac{1}{R_{T1}} (T_1 - T_2) = \frac{1}{R_{T2}} (T_2 - T_3) = \dots = \frac{1}{R_{Tn-1}} (T_n - T_{n+1})$$

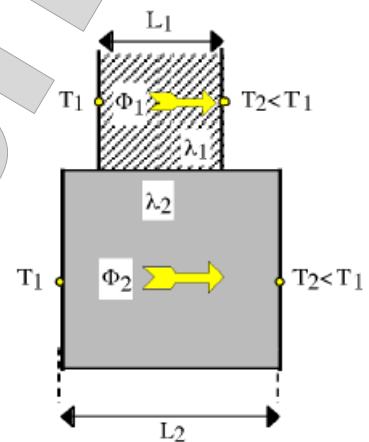
$$\Phi = \frac{T_1 - T_{n+1}}{R_T}$$

Avec : $R_T = \sum_{i=1}^n R_{Ti}$

2- les corps placés en parallèle

$$\phi_{\text{tot}} = \phi_1 + \phi_2 + \phi_3 + \phi_4 + \dots$$

$$\text{D'où : } \Phi = \Delta T \left(\sum \frac{1}{R_{\text{tot}}} \right)$$



Exemple 01

Question: Déterminez la valeur de **U** du mur creux ci-contre.

Solution

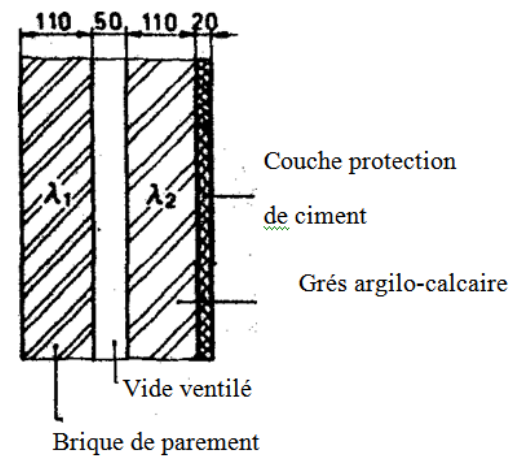
$$R_{mat} = \frac{e_1}{\lambda_1} + \frac{e_2}{\lambda_2} + \frac{e_3}{\lambda_3}$$

$$R_{mat} = \left(\frac{0.11}{0.90} + \frac{0.11}{0.77} + \frac{0.02}{0.93} \right) \frac{m^2 \cdot C}{W}$$

$$R_{tot} = R_e + R_{mat} + R_i + R_{\text{lame d'air}}$$

$$R_{tot} = \left(0.04 + \frac{0.11}{0.90} + \frac{0.11}{0.77} + \frac{0.02}{0.93} + 0.13 + 0.18 \right) \frac{m^2 \cdot C}{W}$$

$$U = \frac{1}{R_{tot}} = 1.57 \text{ W} / m^2 \cdot C$$

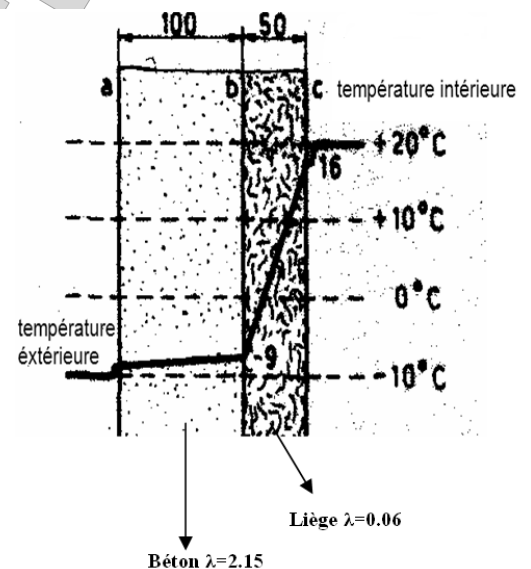
**Exemple 02**

Question: Dessinez l'évolution de la température dans la construction ci-dessous.

Solution

$$R_{tot} = R_e + R_{mat} + R_i$$

$$R_{tot} = \left(0.04 + \frac{0.10}{2.15} + \frac{0.05}{0.06} + \frac{0.02}{0.93} + 0.13 \right) \frac{m^2 \cdot C}{W} = 1.04 \frac{m^2 \cdot C}{W}$$



La variation de température, calculée de l'intérieur vers l'extérieur, dépend des résistances au passage de la chaleur.

La température en surface c est égale à:

$$\frac{T_i - T_e}{R_{tot}} = \frac{T_i - T_c}{R_i} = \frac{T_i - T_b}{R_i + R_{\text{liège}}} = \frac{T_i - T_a}{R_i + R_{\text{liège}} + R_{\text{béton}}}$$

$$T_c = T_i - \left(\frac{R_i}{R_{tot}} \times (T_i - T_e) \right) = 20^\circ C - \left(\frac{0.13}{1.04} \times (30^\circ C) \right) = 16^\circ C$$

De la même façon on aura : $T_b = -9^\circ C$ $T_a = -10^\circ C$

Le matériau qui isole le mieux provoque la plus grande chute de température.

Tableau 1: Valeurs utiles pour calculs de physique du bâtiment
Extrait de la Documentation SIA D0170

Matériau	Masse volumique nominale ρ_a kg/m ³	Conductivité thermique valeur déclarée λ_D (voir chap. 2)	
		contrôlée ¹ W/(m · K)	non-contrôlée W/(m · K)
Laine de verre			
panneaux, matelas, rouleaux	10–120	0.031–0.048	0.055
en vrac	30–100	²	0.060
Laine de pierre			
panneaux, matelas, rouleaux	15–200	0.034–0.048	0.055
en vrac	30–100	²	0.060
Verre cellulaire			
panneaux	100–150	0.040–0.055	0.064
en vrac	250–450	²	0.094
Perlite, Vermiculite en vrac	50–130	²	0.084
Polystyrène, expansé (EPS)	30–15	0.032–0.042	0.048
Polystyrène, extrudé (XPS)			
cellules contenant un gaz isolant	25–65	0.028–0.036	0.043
cellules contenant de l'air	25–65	0.034–0.038	0.046
Polyuréthane (PUR) et Polyisocyanurate (PIR)			
cellules contenant du pentane			
étanche à la diffusion	28–55	0.022–0.027	0.032
perméable à la diffusion	28–55	0.026–0.033	0.037
cellules contenant du CO ₂	35–60	0.032–0.038	0.045
Liège: panneaux, matelas	90–160	0.040–0.047	0.056
Laine de bois			
panneaux	30–150	0.067–0.089	0.107
panneaux de constr. légers	250–450	²	0.095
parements de panneaux multicouches ³			
5 mm	²	²	0.15
7,5 mm	²	²	0.125
10 mm	²	²	0.10
Panneaux de fibres de bois	120–300 300–600	0.044–0.065 ²	0.080 0.110
Cellulose (fibre de)			
panneaux	²	²	0.065
en vrac	30–80	²	0.060
Mat. isolants d'origine végétale			
panneaux à fibres plates	25–35	²	0.055
panneaux de roseaux	150–200	²	0.072
matelas de fibres de coco	50–100	²	0.066
coton	> 25	²	0.055
Mat. isolants d'origine animale			
laine de mouton	20–60	²	0.055

Groupe de matériaux ou application	Masse volumique ρ kg/m ³	Conductivité thermique utile λ W/(m·K)
Paroi sans enduit		
Brique terre cuite BTC modulaire	1100	0.44
BTC modulaire, en boutisse et paneressé	1100	0.37
BTC isolante	1200	0.47
BTC de parement	1400	0.52
BTC pleine de cheminée	1800	0.80
Brique silico-calcaire	1600	0.80
	1800	1.00
	2000	1.10
Aggloméré plein en ciment	2000	1.10
Aggloméré creux en ciment	1200	0.70
Béton cellulaire	300	0.10
	400	0.13
	500	0.16
	600	0.19
Pierre naturelle		
Roche cristalline	2800	3.5
Roche sédimentaire	2600	2.3
Basalte	2700 – 3000	3.5
Granit	2500 – 2700	2.8
Marbre	2800	3.5
Ardoise	2000 – 2800	2.2
Grès (silice, molasse)	2600	2.3
Sol		
Argile ou limon	1200 – 1800	1.5
Sable et gravier	1700 – 2200	2.0
Béton ¹		
densité moyenne	1800	1.15
	2000	1.35
	2200	1.65
haute densité	2400	2.00
armé (avec 1% d'acier)	2300	2.3
armé (avec 2% d'acier)	2400	2.5
Enduit, mortier		
Enduit intérieur, pour calcul normal	1400	0.70
Enduit extérieur, pour calcul normal	1800	0.87
Enduit isolant extérieur	300	0.08
	450	0.14
Mortier de chaux	1800	0.87
Mortier bâtard	1900	1.00
Mortier de ciment	2200	1.40
Enduit isolant au plâtre	600	0.18
Enduit plâtre	1000	0.40
	1300	0.57

Groupe de matériaux ou application	Masse volumique ρ kg/m ³	Conductivité thermique utile λ W/(m·K)
Plâtre		
Plâtre	600	0.18
	900	0.30
	1200	0.43
	1500	0.56
Plaque de carton-plâtre ²	900	0.25
Bois ³		
Bois	500	0.13
	700	0.18
Panneau de fibres	250	0.07
	400	0.10
	600	0.14
	800	0.18
Panneau de particules	300	0.10
	600	0.14
	900	0.18
Panneau de particules liées au ciment	1200	0.23
Matériaux divers		
Métaux		
Alliages d'aluminium	2800	160
Acier	7800	50
Acier inoxydable	7900	17
Verre (verre sodo-calcique, y.c. «verre flotté»)	2500	1.00
Quartz	2200	1.40
Eau +10°C	1000	0.60
Eau +40°C	990	0.63
Glace à -10°C	920	2.30
Glace à 0°C	900	2.20
Neige, fraîchement tombée (< 30 mm)	100	0.05
Chlorure de polyvinyle (PVC)	1390	0.17
Planelle		
Céramique / porcelaine	2300	1.3
Plastique	1000	0.20
Caoutchouc		
Naturel	910	0.13
Néoprène (Polychloroprène)	1240	0.23
Caoutchouc butyle	1200	0.24

¹ La masse volumique pour le béton est calculée après séchage.

² La conductivité thermique tient compte de l'effet des revêtements papier.

Exemple 1

Construction de l'élément (schéma, coupe)		Designation de l'élément <u>Mur extérieur</u>			$\frac{R}{h}$ resp. $\frac{d}{\lambda}$
	No de la couche	Matériau de construction	d m	$\frac{h}{W/(m^2 \cdot K)}$	$m^2 \cdot K/W$
				$\frac{\lambda}{W/(m \cdot K)}$	
	—	Transfert surfacique intérieur (h_i)	—	8	0.13
	1	Crépi intérieur	0.015	0.70	0.02
	2	Brique terre cuite	0.15	0.44	0.34
	3	Saglan SB 22	0.16	0.036	4.44
	4	Brique terre cuite	0.12	0.44	0.27
	5	Crépi extérieur	0.02	0.87	0.02
	—	Transfert surfacique extérieur (h_e)	—	25	0.04

Tabl. A

valeur $U = \frac{1}{R_{total}} = 0.19 \text{ W/(m}^2 \cdot \text{K)}$

$R_{total} = 5.26$

Construction de l'élément (schéma, coupe)		Designation de l'élément <u>Dalle des combles</u>			$\frac{R}{h}$ resp. $\frac{d}{\lambda}$
	No de la couche	Matériau de construction	d m	$\frac{h}{W/(m^2 \cdot K)}$	$m^2 \cdot K/W$
				$\frac{\lambda}{W/(m \cdot K)}$	
	—	Transfert surfacique intérieur (h_i)	—	—	0.13
	1	Dalle en béton	0.18	2.3	0.08
	2	Pare-vapeur	—	—	—
	3	Isover Luro 414 (2x8 cm)	0.16	0.037	4.32
	4	Panneau aggloméré	0.016	0.14	0.11
Tabl. A	—	Transfert surfacique extérieur (h_e)	—	—	0.13

valeur $U = \frac{1}{R_{total}} = 0.21 \text{ W/(m}^2 \cdot \text{K)}$

$R_{total} = 4.77$

1 La valeur λ a été tirée du Cahier technique SIA 2001 « Isolants thermiques » (édition 2001).

2 Contre un espace non chauffé: $R_{se} = \frac{1}{h_e} = 0.13 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$ (chap. 2.3.1).

Construction de l'élément (schéma, coupe)		Désignation de l'élément Maçonnerie à double paroi			$\frac{R}{h}$ resp. $\frac{d}{\lambda}$
No de la couche	Matériau de construction	d m	$\frac{h}{\lambda}$ $\frac{W}{(m^2 \cdot K)}$	$\frac{\lambda}{W}$ $\frac{m^2 \cdot K}{W}$	$m^2 \cdot K/W$
—	Transfert surfacique intérieur (h_i)	—	8		0.13
1	Brique de parement	0.15	0.44		0.34
2	Panneau isolant Flumroc 1	0.16	0.034		4.71
3	Brique terre cuite	0.12	0.44		0.27
4	Crépi extérieur	0.02	0.87		0.02
—	Transfert surfacique extérieur (h_e)	—	20		0.05

Tabl. A

$$\text{valeur } U = \frac{1}{R_{\text{total}}} = 0.18 \text{ W/(m}^2 \cdot \text{K)}$$

$$R_{\text{total}} = 5.52$$

II) Techniques d'Isolation thermique

II-1) Isolation des murs

Malgré son épaisseur rassurante, un mur de pierre de 70 cm d'épaisseur est équivalent à 1 cm de laine isolante sur le plan de l'isolation thermique, la conductivité thermique de la pierre étant beaucoup plus élevée que celle de l'air emprisonné entre les fibres d'isolant. Un mur non isolé est froid et favorisera la condensation de la vapeur d'eau si des enduits à base de ciment ou un pare-vapeur l'empêche d'évacuer naturellement cette vapeur d'eau.

Les méthodes d'isolation des murs

Il existe **3 principes** pour réaliser l'isolation thermique d'un mur, ils diffèrent par l'usage projeté de l'habitation :

1. **l'isolation intérieure** et les cloisons de doublage. Cette solution, la plus répandue, est aussi la plus facile à mettre en œuvre. L'isolation intérieure sera choisie pour les cas de rénovations dans les appartements (car il est difficile d'intervenir sur l'extérieur du bâtiment) et pour les résidences secondaires. Dans ce dernier cas, l'occupation intermittente ne permet pas de chauffer durablement la masse thermique des murs. L'isolation intérieure laisse donc le mur à l'extérieur de la zone isolée et permet une montée en chauffe rapide adaptée à un usage temporaire. Elle a l'avantage (qui est aussi un inconvénient dans certains cas) de ne pas présenter d'inertie thermique. La contrepartie de l'isolation intérieure est une réduction de l'espace intérieur et la présence de nombreux ponts thermiques restant à traiter. La qualité d'une isolation intérieure peut diminuer avec le temps (tassement des laines derrière les plaques de plâtre, trous de souris dans le polystyrène, etc.)
2. **l'isolation extérieure** et les bardages. Cette solution, souvent plus coûteuse, nécessite généralement une épaisseur d'isolant plus faible. L'isolation extérieure est plus adaptée à l'isolation des résidences principales. Elle permet de conserver la masse thermique du mur à l'intérieur de l'enveloppe isolée. L'habitation, chauffée en continu, monte en température lentement dans toute sa masse mais se refroidit faiblement lorsqu'elle est inoccupée. L'isolation extérieure est par contre difficile à mettre en œuvre sur certains édifices anciens (pierre apparente, façades ouvragées) et nécessite presque toujours l'intervention de professionnels qualifiés. On choisira cette dernière solution si les dépenses de chauffage sont importantes car l'isolation obtenue est forte. Une isolation extérieure est intéressante car elle n'empiète pas sur le domaine habitable. Son épaisseur, donc son efficacité, ne peut guère dépasser 15 cm mais elle supprime facilement les ponts thermiques (abouts de planchers,...) sauf au niveau des fondations. Une épaisseur de 10 cm d'un isolant extérieur équivaut à 20 à 25 cm du même isolant intérieur sur le total des consommations s'il y a beaucoup de ponts thermiques. Autrement les qualités de résistance thermique ($m^2.K/W$) ou de coefficient de transmission surfacique (U en $W/m^2.K$) sont identiques pour une isolation extérieure ou intérieure : 10cm de l'une équivaut à 10 cm de l'autre du point de vue de la thermique d'hiver. On l'utilise principalement en rénovation.
3. **L'isolation intégrée** au matériau porteur. Cette solution utilise des matériaux qui intègrent un isolant dans leur structure : béton cellulaire, brique de chanvre, brique de terre cuite avec âme isolante, etc. L'isolation intégrée est généralement utilisée en construction neuve. Cette solution est performante et durable.

On trouve aussi maintenant des briques multi-alvéolaires communément appelé MONOMUR ayant tous les avantages de la brique, étant mur porteur et apportant une isolation supérieure à l'isolation traditionnelle par doublage des murs, évite ainsi l'ajout de main d'œuvre et de matériaux supplémentaires. Ces briques existent de 24 cm jusqu'à 49 cm d'épaisseur. L'assemblage se fait généralement à l'aide de colle et non de mortier de ciment.

II-2) Isolation des planchers

Par plancher, on entend le sol sur lequel on circule : dalle en béton, ou plancher sur solives. Le plafond d'un niveau correspond évidemment au plancher de l'étage supérieur. L'isolation thermique des planchers est importante pour le confort (en gardant les pieds au chaud) et pour l'économie d'énergie dans le cas d'une dalle chauffante.

L'isolation des planchers combat deux causes de déperditions thermiques :

- pertes vers l'étage inférieur non chauffé (sous-sol, vide sanitaire, terre-plein...) ;
- pertes par ponts thermiques.

Du fait que l'air chaud a tendance à s'accumuler au plafond et que la différence de température entre sous-sol et volume habitable est moins importante en hiver qu'entre l'extérieur et volume habitable, l'épaisseur de l'isolation nécessaire est plus faible (de l'ordre de 6 cm en plancher par rapport à 10 à 20 cm dans les combles).

Pour isoler un plancher on peut :

- soit isoler la sous-face de celui-ci en fixant des panneaux isolants au plafond du niveau inférieur ou en utilisant une dalle avec hourdis isolants ;
- soit réaliser une chape isolante (béton avec granulats isolants), une dalle flottante sur polystyrène expansé à haute densité (cas de la dalle chauffante), un plancher sur lambourdes séparées par de la laine
- soit isoler avec de la ouate de cellulose en vrac, par l'étage du dessus ou du dessous; dans le premier cas on procède par bourrage lâche dans le plancher ouvert et, dans le deuxième cas, en soufflant le produit à travers une membrane brochée. On peut aussi souffler la ouate de cellulose à travers un plafond fermé en soufflant le produit à travers des trous de deux pouces de diamètre dans lesquels on insère le boyau.

II-3) Isolation sous les toitures et terrasses

En climat tempéré, la première source de déperdition thermique des maisons est la toiture (jusqu'à 30 %, voire plus). La fonte de la neige sur les toitures montre ici les défauts d'isolation entre maisons, se traduisant par un **gaspillage d'énergie** et des dépenses accrues, ainsi que des impacts sur l'environnement. En l'absence de neige, une thermographie rend visible ces pertes de chaleur

Comme l'air chaud monte par convection, la température est plus élevée au plafond et il est donc logique de placer une couche d'isolant plus épaisse dans les combles que sur les murs. Sous le toit les entrées d'air doivent être plus spécialement traitées, car il n'y a pas d'étanchéité des murs. La couche d'isolant doit être protégée contre les intrusions de la fouine ou des lémmings, en fermant à l'aide d'un grillage solidement fixé l'espace entre les chevrons au niveau de la sablière.

Plusieurs solutions sont possibles pour l'isolation sous le toit, en fonction de la résistance thermique souhaitée et de l'espace disponible :

- peu d'espace et isolation faible — film réfléchissant fixé sous les chevrons, coûteux et de faible efficacité en pratique ;
- peu d'espace et isolation moyenne — isolant entre les chevrons, de mise en œuvre délicate, car l'espacement entre chevrons est rarement régulier ;
- espace disponible et isolation forte — double épaisseur de panneaux isolants fixés à l'intérieur d'une structure en caissons, entre les pannes ou encore soufflage d'un isolant en vrac (par exemple: ouate de cellulose ou laine de roche) après avoir installé les déflecteurs de ventilation

entre les chevrons. La structure supporte aussi les plaques de plâtre, des panneaux d'aggloméré, de la frise de pin...

L'isolation est mise en place après la pose des conduits de fumée et des fenêtres de toit. Prévoir le passage des gaines de ventilation, des câbles de télévision, des gaines électriques...

II-4) Isolation des portes et fenêtres

Les ouvertures vitrées sont les points faibles de l'isolation globale de la construction. Limiter la surface de ces ouvertures est une solution pour réduire les déperditions, éviter les ouvertures au nord et côté du vent (souvent à l'ouest). Cette solution entraîne cependant une réduction de l'éclairage des pièces, une diminution des apports solaires (sources d'économies d'énergie en confort d'hiver) et une dégradation du confort. Un calcul de performance énergétique s'impose pour déterminer la bonne surface qui réalise le bon arbitrage entre gain en apports solaires et lumineux et pertes en isolation thermique.

On choisira donc de préférence les solutions suivantes :

- utiliser le double-vitrage à **faible émissivité** de 24 mm d'épaisseur totale minimum (RT 2005),
- choisir des huisseries épaisses en bois ou PVC de bonne qualité ou en aluminium avec rupture de pont thermique (offre standard depuis la RT 2000),
- vérifier l'étanchéité des joints, y compris en bas de portes,
- installer des volets étanches, si possible au droit de la façade pour limiter les effets du vent. Les volets roulants en PVC à double parois et caisson extérieur (dans l'épaisseur du mur) sont une des bonnes solutions. Par contre les volets roulants à lames aluminium double parois même injectées de mousse polyuréthane présentent une moins bonne isolation thermique. En effet, les lames aluminium favorisent les échanges thermiques avec l'extérieur contrairement aux lames PVC.
- installer des doubles-rideaux épais devant portes et fenêtres,
- supprimer les ponts thermiques au niveau des seuils et appuis de fenêtres.

La pose de doubles-fenêtres est une excellente solution contre :

- le bruit ;
- les entrées d'air (caissons de volets roulants, huisserie anciennes déformées, difficulté de poser des joints).

Par contre, la manœuvre et l'entretien des doubles-fenêtres est malaisée, leur esthétique discutable et leur coût élevé.

La pose de sur-vitrages est généralement une solution bon marché et peu efficace mais qui peut rendre service en rénovation.

Pour réduire le rayonnement infrarouge pénétrant par les vitrages sud en été, il est possible de coller un film réfléchissant. Cette solution est assez efficace mais onéreuse. En plein jour, elle protège également des regards indiscrets (cas des rez-de-chaussées) sinon opter pour des doubles vitrages avec les fonctions de contrôle solaire.

En ce qui concerne le confort d'hiver, il faut compter avec les apports solaires. Il peut s'avérer optimal de préférer des fenêtres aluminium à des fenêtres PVC : les premières sont moins isolantes que les secondes mais, du fait de la finesse des profilés, l'aluminium maximise le clair de vitrage et procure de fait une meilleure performance énergétique.

II-5) Le pare-vapeur/coupe-vent

La face intérieure de l'isolation (côté chaud) doit être munie d'un film étanche à l'air qui remplit deux fonctions : celle de pare-vapeur et celle de coupe-vent. Ce film étanche fonctionne donc dans les deux sens :

- interdire à l'air chaud et chargé de vapeur d'eau de pénétrer dans l'isolant et d'y provoquer de la condensation ;
- empêcher le vent de s'infiltrer, au travers de l'isolation, dans le volume chauffé.

Les canalisations électriques et autres gaines qui traversent l'isolation ne doivent pas favoriser le passage des courants d'air, il faut les immobiliser fermement, les entourer d'isolant et les boucher aux extrémités (un morceau de papier ou un peu d'enduit, facilement retirable en cas de besoin) pour éviter la circulation d'air parasite par celles-ci entre les différentes pièces, les combles, les vides sanitaires et les pièces non chauffées. Idéalement, entre la finition intérieure et le pare-vapeur, on laisse un passage technique pour l'électricité et la plomberie, ainsi, on ne troue pas le pare-vapeur.

L'utilisation du frein vapeur hygrovariable permet de garantir la durabilité de votre isolation en évitant la surcharge d'humidité dans le bâti. Le frein vapeur hygrovariable (ouvert à la diffusion de la vapeur d'eau) fonctionne selon le principe de la membrane régulée par les conditions climatiques : en hiver il protège contre l'humidité, en été sa structure moléculaire s'ouvre et permet un séchage sûr.

Contrairement au pare-vapeur, le frein vapeur hygro-variable vous garantit une construction qui respire, donc plus saine.

II-6) Isolation des ponts thermiques

Les ponts thermiques, sortes de courts-circuits dans l'isolation intérieure, doivent être réduits au maximum. Pour ce faire, on peut agir dès la conception en préférant un plancher sur solives, une ferme intérieure plutôt qu'un mur de refend ou plus simplement en construisant son mur avec un matériau isolant (béton cellulaire, brique monomur, etc.). Une autre solution consiste à isoler par l'extérieur avec l'inconvénient de laisser un pont thermique au niveau des fondations.

Lors de la réalisation on pourra appliquer différentes solutions :

- détacher les murs de refend pour pouvoir insérer la couche d'isolation entre l'extrémité du refend et le mur extérieur (ceci-dit un mur de refend doit jouer son rôle ce qui limite cette possibilité) ;
- isoler le tour de dalle à l'aide d'une brique creuse ou d'une planelle en béton cellulaire ;
- doubler les murs de refend avec une couche d'isolant de quelques centimètres ;
- poser un faux plafond isolé ou isoler les planchers en sous-face ;
- réaliser des dalles flottantes.

Le développement de moisissures sur les parois trahit la présence de condensation, donc d'une zone froide provoquée par un pont thermique. Comme il est difficile de traiter un pont thermique *a posteriori*, on peut essayer de tapisser les murs concernés à l'aide d'une couche mince d'isolant (quelques millimètres) recouverte d'un papier peint ou d'un revêtement mural (tissus...).

Dans un bâtiment non isolé, les ponts thermiques représentent de faibles déperditions (en général inférieures à 20 %) car les pertes globales de chaleur par les parois sont très importantes. En revanche, lorsque les parois sont isolées de manière importante, le pourcentage de déperditions causées par les ponts thermiques devient élevé (plus de 30 %) mais les déperditions globales sont très faibles. C'est pour cette raison que dans des bâtiments à faible consommation énergétique, il est primordial d'avoir

de très fortes résistances thermiques pour les parois et de s'assurer d'avoir de faibles pertes de chaleur au niveau des jonctions.

II-7) Isolation thermique par l'extérieur (ITE)

30 % de la chaleur d'un bâtiment est perdue via les murs mal isolés, l'ITE est plus efficace que l'isolation par l'intérieure. Elle a d'abord été utilisée pour les bâtiments collectifs (HLM notamment) et de plus en plus pour les maisons particulières. Le « manteau isolant » augmente l'inertie thermique de tout le bâtiment et règle tout ou partie des problèmes de ponts-thermiques, ce qui présente un avantage important en régime transitoire. A qualité d'isolant égale, elle diminue beaucoup les pertes de chaleur l'hiver et conserver la fraîcheur de la nuit dans la maison pendant l'été. En France, elle devrait être encouragée par la RT 2012 (obligation au 28 oct. 2011 pour les bâtiments neufs de répondre à la norme bâtiments basse consommation (BBC ; moins de 50 kWh/m²/an pour les logements ANRU (Agence nationale pour la rénovation urbaine) dans des zones où le marché immobilier a un besoin manifeste de revitalisation et dans les bureaux et les locaux d'enseignement. Fin 2011, tous les bâtiments tertiaires et autres logements devront aussi y répondre, tout en respectant les dispositions du PLU ou du RNU. En France en 2011, 170 millions de m² de revêtement façade constitueraient 75 à 80 % du marché de la rénovation des bâtiments collectifs, la maison individuelle neuve ne constituant que 3 % du marché, et la rénovation de l'ancien encore moins.

Techniques : L'ITE se conçoit sur des murs plans et verticaux (maçonneries de parpaings, briques, blocs de béton cellulaire, revêtues ou non d'un enduit ciment ; des parois en béton banché ou préfabriqué ; des maçonneries de pierre. L'isolant (panneaux d'isolants divers (écomatériaux éventuellement), briques de polystyrène expansé collées... est fixé sur le mur à l'extérieur de l'habitation et protégé par un enduit ou lambris, éventuellement lors d'une démarche de rénovation de façade. Pour l'étanchéité, une des solutions est une première couche ou sous-enduit avec armature en fibre de verre marouflée dans son épaisseur est généralement apposée pour satisfaire aux principales fonctions mécaniques. Dans un second temps, une deuxième couche ou enduit de finition est appliquée pour les fonctions décoratives d'aspect. Un usage mixte est possible (ex ITE en façade arrière uniquement pour un immeuble dont la façade est patrimoniallement intéressante), mais avec une légère perte d'isolation. De systèmes d'isolation de toitures par l'extérieur existent aussi, faciles à combiner avec une rénovation de toiture et de réfection de combles ou pose de panneaux solaires.

Avantages: Ce sont

- suppression de tous les ponts thermiques des dalles de plancher, des murs de refend et autres cloisons ;
- jusqu'à 80 % d'économie d'énergie pour les bâtiments les plus énergivores en limitant de façon importante la déperdition de chaleur par la façade et en limitant les ponts thermiques ;
- utilisation de l'inertie des murs pour récupérer les apports extérieurs, les apports ménagers, et qui deviennent avec un chauffage adéquat de véritables radiateurs basse température ;
- un meilleur confort thermique du fait que les murs lourds et donc conducteurs thermiques absorbent mieux la chaleur rayonnée par les occupants des lieux ;
- pas de condensation dans les murs qui sont à la même température que l'air ambiant intérieur ;
- utilisation possible de la chaufferie la nuit en période hivernale uniquement pour la production ECS (eau chaude sanitaire) en coupant le chauffage deux à trois heures sans perte de température significative, ce qui simplifie la régulation dans le cas d'une chaufferie à base de pompe à chaleur aquathermique ;
- pas d'émanation de gaz nocif de polystyrène et colle dans l'air du logement, pas de problème d'accrochage des meubles de cuisine et de salle de bain, et des tringles à rideaux, pas d'apparition des bandes de collage ;
- la surface habitable n'est pas diminuée ;
- elle peut se faire sans interrompre l'occupation du logement dans le cas d'une rénovation.

Inconvénients :

- coût souvent plus élevé (en raison du coût d'installation de l'échafaudage) à résistance thermique égale (variable selon la complexité des formes extérieures du bâti. Des solutions préfabriquées pourraient dans certains cas réduire ces coûts) ;
- quelques difficultés de réflexion à la conception pour l'implantation des combles et du garage ou sous-sol ;
- une technique moins abordable pour l'autoconstructeur mais néanmoins réalisable ;
- elle modifie l'aspect extérieur du bâtiment ce qui, dans le cas de rénovations en zone patrimoniale, peut poser problème.

II-8) Pose de l'isolant

Les matériaux isolants à base de fibre de verre ou fibre de roche sont désagréables à poser. Utiliser des gants, un masque à poussière, des lunettes de sécurité et une combinaison de travail au col et aux poignets serrés. Essayer de ventiler le local.

L'isolation des sous-pentes peut se faire à l'aide de laine en rouleau munis d'un pare-vapeur que l'on agrafe sur les chevrons. Cette solution n'est possible que si l'écartement des chevrons correspond exactement à la largeur des rouleaux. En pratique l'épaisseur d'isolant ne dépassera guère 8 cm, ce qui est insuffisant dans la plupart des régions. Il est certainement plus pratique d'utiliser des panneaux découpés à l'écartement des chevrons ou de placer l'isolant en sous-face.

Dans le cas d'un isolant à bourrage lâche comme la ouate de cellulose, l'isolant est soufflé uniformément dans le grenier à la suite de l'installation de déflecteurs de ventilation. Pour les murs, une membrane est brochée à l'ossature de la structure avant d'y souffler l'isolant à haute densité.

Vérifier que les recoins sont comblés d'isolant, si nécessaire bourrer de la laine isolante dans les moindres trous. Condamner tous les orifices où des rongeurs pourraient pénétrer. On peut utiliser de la mousse de polyuréthane pour reboucher les trous ou remplir des alvéoles.

II-9) À propos de la sur-isolation

On peut être tenté de doubler l'épaisseur de l'isolation des murs. Ce n'est pas une mauvaise chose mais il faut tenir compte des points suivants :

- doubler l'épaisseur de l'isolant ne coûte pas 2 fois plus cher (la main d'œuvre est la même) mais diminue (théoriquement) les déperditions de moitié. Car le coefficient d'isolation thermique (dénommé R) sera doublé. Par exemple, 10 cm de laine de verre apportent un coefficient R de 2.5, donc 2 fois 10 cm apporteront un coefficient R de 5. Une pose croisée des deux couches permettra aussi de limiter les déperditions.
- l'épaisseur de l'isolant intérieur est autant de place perdue pour l'espace habitable : 10 cm d'isolant sur un pourtour de 40 mètres (étage de 10×10m) correspond à 4 m² de surface perdue.
- une isolation performante nécessite un soin particulier: traiter les embrasures, ne pas créer de ponts thermiques, rendre l'enveloppe étanche à l'air, prévoir un pare-vapeur, prévoir une ventilation efficace.
- l'isolant extérieur (en rénovation) résout ce problème. À partir des matériaux renouvelables (ouate de cellulose, bois, déchet agricole...chanvre, paille, liège) il est possible de réduire l'énergie grise vis-à-vis d'un isolant classique (laine de roche, verre ou plastique)³
- En respectant la norme Passivhaus (ép. environ 35cm), vous économisez sur le système de chauffage et investissez dans la sur-isolation. Le retour sur investissement est fonction des économies d'énergies réalisées (Calcul en fonction de l'évolution du coût de cette énergie).
- pour être optimisée, l'isolation doit être cohérente. Les efforts pour isoler doivent être identiques pour les murs, la ventilation des portes et fenêtres...

III) Humidité

III-1) Humidité ou hydrométrie :

C'est l'eau ou vapeur d'eau contenue dans l'air ou dans les matériaux.

Exprimés à travers :

- Humidité absolue : le poids de vapeur d'eau (en g) par m³ d'air.
- Humidité spécifique : le poids de vapeur d'eau (en g) par kg d'air humide.
- Humidité relative (HR) : proportion d'eau contenue dans l'air en % par rapport à un air saturé.

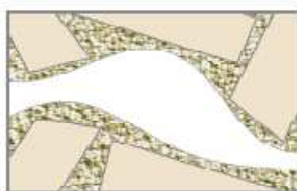
La majorité des matériaux poreux sont capables de contenir de l'humidité (stockage) selon les conditions ambiantes dans lesquelles ils sont plongés. L'eau peut être présente sous différentes formes au sein des pores du matériau. On parle d'eau de constitution quand les molécules d'eau sont chimiquement intégrées à la structure poreuse, d'eau adsorbée quand une pellicule d'eau se dépose sur la surface des pores, d'eau capillaire quand certains pores se remplissent d'eau et d'eau libre quand elle est présente dans les pores mais circule librement à travers ceux-ci (sous forme liquide ou de vapeur).

III-2) Teneur en eau et courbe de rétention d'humidité

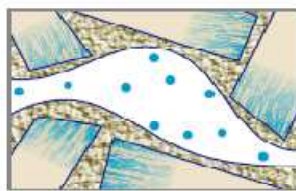
La teneur en eau d'un matériau évolue principalement en fonction de l'humidité relative de l'ambiance dans laquelle il est plongé. Elle est notée w et s'exprime en kg/m³ (ou en % de masse). La teneur en eau des matériaux est toujours égale à 0 kg/m³ à 0 % d'humidité relative. Elle évolue doucement jusqu'à 80 % ou 90 %, voire plus selon les matériaux (leur composition, leur porosité...). C'est la zone hygroscopique, où l'eau est principalement adsorbée. La teneur en eau dans cette zone reste modérée : très basse pour certains matériaux (brique, béton cellulaire...) et plus élevée pour d'autres (bois, cellulose...).

Au-delà de cette humidité relative, et jusqu'à la saturation (100 %), on entre dans la zone capillaire.

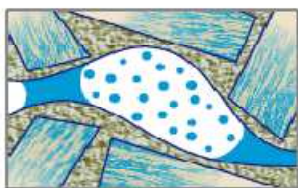
La teneur en eau augmente alors beaucoup plus vite et peut atteindre des valeurs élevées. À 100 % d'humidité relative, on atteint la « saturation libre » (w_f), où les pores du matériau ne sont pas encore forcément complètement remplis d'eau. La teneur en eau peut encore augmenter si le matériau est plongé dans l'eau : longtemps, sous vide ou sous pression. C'est la « sursaturation ». En pratique, il est assez rare d'atteindre la teneur en eau maximale (w_{max}) où tous les pores sont remplis d'eau. Les illustrations ci-dessous expriment ces notions.



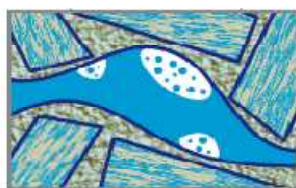
Etat sec



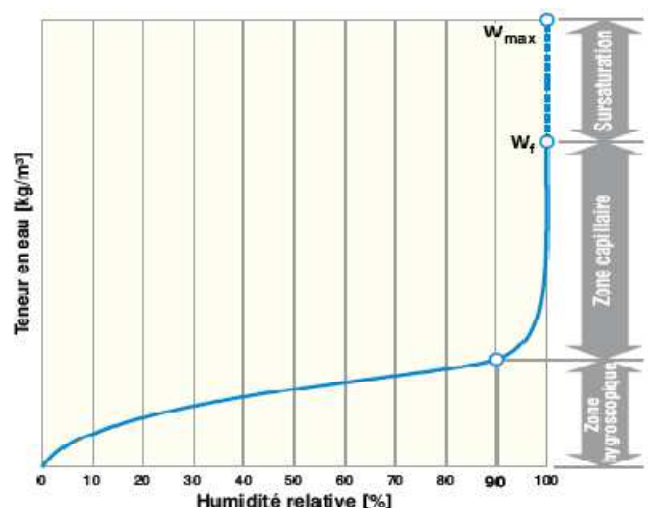
Zone hygroscopique



Zone capillaire



Sursaturation



Courbe de rétention d'humidité.

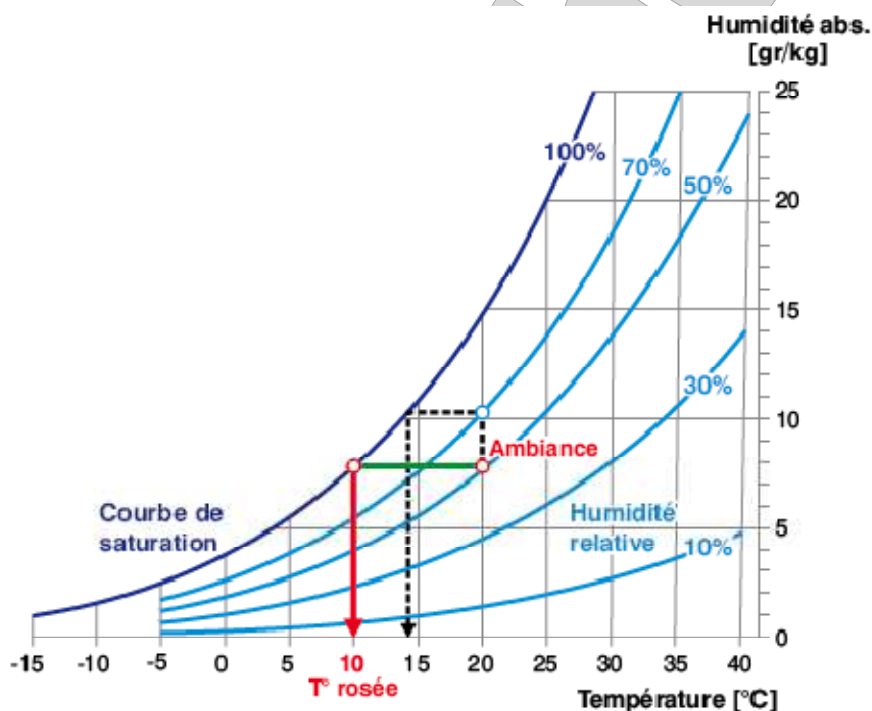
La teneur en eau des matériaux influence l'ensemble des paramètres hygrothermiques du matériau. En effet, la masse volumique évolue selon la teneur en eau, mais c'est aussi le cas de la capacité thermique, de la conductivité thermique... Les phénomènes en jeu sont complexes et dépassent le cadre de ce document, mais il apparaît donc que la teneur en eau des matériaux ne doit pas être négligée.

Du point de vue des transferts d'humidité, il est important de distinguer plusieurs phénomènes : d'une part, le transfert de vapeur, et de l'autre, le transfert d'eau liquide, soit par absorption, soit par redistribution.

La force motrice de ces phénomènes est différente, et, bien qu'ils soient interdépendants, ces transferts peuvent donc parfois avoir des directions opposées.

III-3) Point de rosée et condensation superficielle

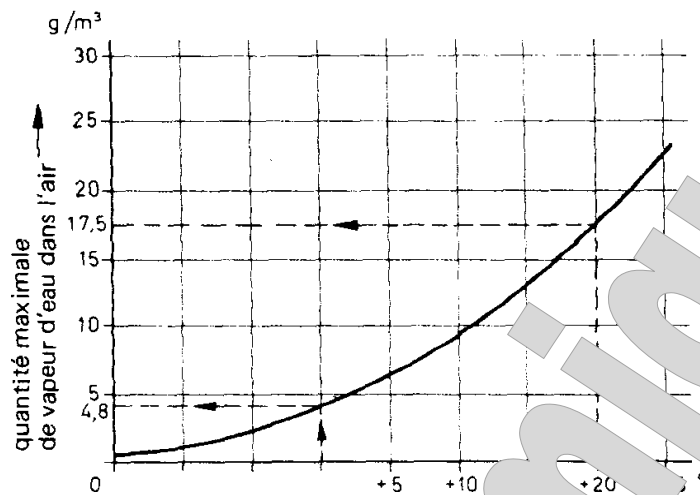
L'air intérieur ayant une température, une humidité relative et une pression données peut arriver en contact avec l'un de ces ponts thermiques où la température de surface est plus faible. L'air arrivé à cet endroit se refroidit et la température qu'il atteint dans le voisinage de la surface peut se retrouver en dessous du point de rosée, ce qui provoque de la condensation sur cette surface (la pression de vapeur dans l'air atteint la pression de saturation). La figure ci-dessous montre l'évolution de l'état de cet air sur le diagramme de **Mollier** : pour un air à **20 °C, 50 % d'HR**, la condensation apparaît lorsque la température est réduite à **10 °C** ou moins (à pression constante).



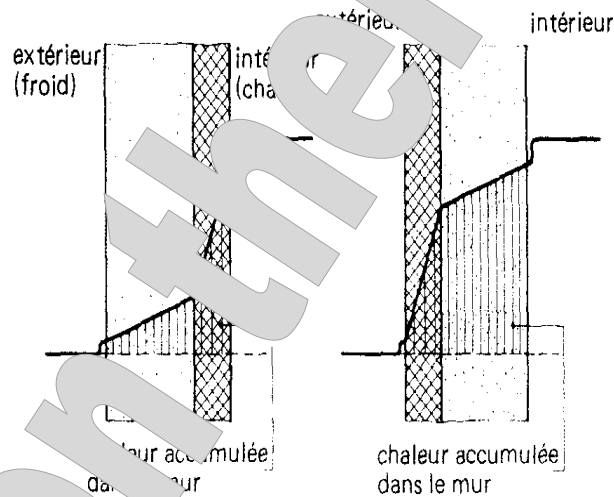
Exemple de représentation sur le diagramme de Mollier.

III-4) Condensation

Dans l'air ambiant, il y a toujours de la vapeur d'eau. Plus la température est élevée, plus l'air peut contenir de la vapeur d'eau (cf. graphique).



La plupart du temps, l'air contient moins de vapeur d'eau qu'il ne peut en contenir.



La condensation survient lorsque la température décroît brusquement ou lorsqu'une surface froide est présente dans un local chaud. Prenons, par exemple, un local où règne une température de + 20°C. L'humidité relative est de 80%. L'air contient donc $0,80 \times 17,5 \text{ g/m}^3$; 14 g d'eau par m³ d'air. Il va geler et la température près de la fenêtre passe à 0°C. L'air près de la fenêtre peut donc contenir 4,8 g/m³ au maximum; il y a 14 g/m³ donc il y a condensation de la vapeur d'eau.

La température à laquelle commence la condensation est appelée **point de condensation (point de rosée)**.

La formation de condensation est nocive car elle peut provoquer des dégâts à la construction (**l'humidité favorise la détérioration des matériaux**); le pouvoir isolant du matériau diminue. Des espaces humides sont en outre malsains.

Exemple 01

Question:

Y aura-t-il formation de condensation sur la couche de plâtre ci-dessous?

Solution:

$$R_{\text{tot}} = R_e + R_{\text{brique}} + R_i + R_{\text{platre}}$$

$$R_{\text{tot}} = \left(0.04 + \frac{0.22}{0.81} + \frac{0.02}{0.93} + 0.15 \right) = 0.48 \frac{\text{m}^2 \cdot \text{C}}{\text{W}}$$

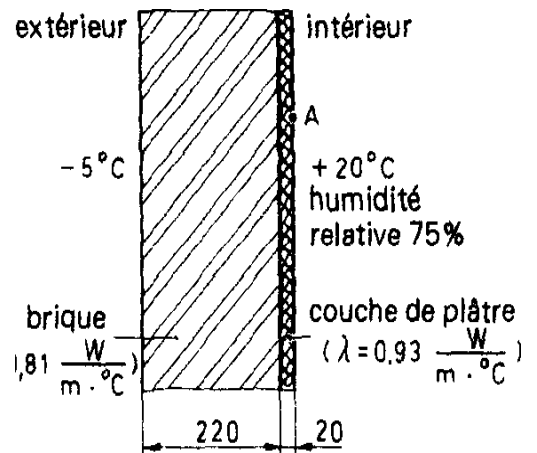
La température en A vaut:

$$T = 20^\circ\text{C} - [(0.15/0.48) \times 25^\circ\text{C}] = 12.2^\circ\text{C}$$

L'air intérieur contient $0.75 \times 17.5 \text{ g/m}^3 = 13 \text{ g/m}^3$.

A 12,2°C l'air peut contenir moins de **13 g/m³**

et il y a donc condensation.



IV) Ventilation :

IV-1) Définition

Dans la plupart des bâtiments anciens, de nombreuses infiltrations d'air se produisent au droit des défauts d'étanchéité de l'enveloppe.

Celles-ci entraînent des déperditions et donc des consommations d'énergie importantes, mais permettent aussi une certaine « ventilation » du bâtiment.

Si le bâtiment devient très étanche, ces pertes diminuent, mais l'humidité n'est plus évacuée. Il est donc primordial lorsqu'on isole l'enveloppe d'un bâtiment de concevoir en parallèle une stratégie de renouvellement d'air qui prenne en charge les aspects suivants :

- satisfaire les besoins en oxygène des occupants
- évacuer la vapeur d'eau dégagée par les occupants et leurs activités
- limiter la pollution intérieure (CO₂ et autres polluants intérieurs)
- améliorer le confort en éliminant odeurs et fumées

Dans un premier temps, il faut choisir le type d'installation de ventilation (naturelle, simple flux, double flux) en fonction non seulement des contraintes imposées par le type de bâtiment, le climat, l'étanchéité à l'air de l'enveloppe extérieure et l'environnement, mais aussi de celles induites par le coût et la performance de l'installation, l'énergie d'utilisation et la facilité de maintenance.

Les composants d'une installation (ventilateurs, conduits, diffuseurs, bouches d'amenées d'air, extracteurs d'air, grilles, etc.) doivent répondre à ces contraintes, mais assurer un débit d'air permettant de satisfaire la réglementation et d'atteindre le confort.

Des mesures et des calculs permettent de vérifier si les composants d'une installation de ventilation sont adaptés aux besoins.

Par ces méthodes, diverses estimations sont possibles, comme par exemple :

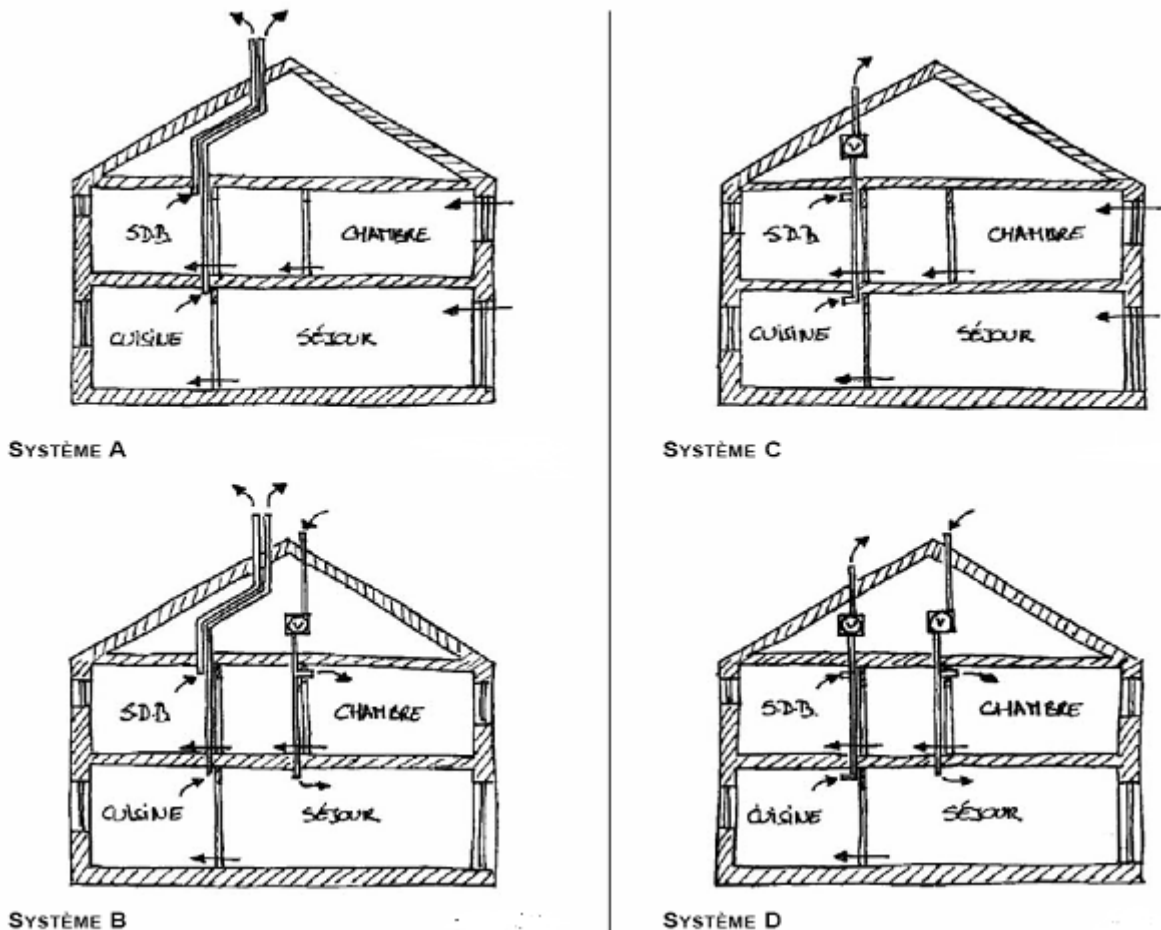
- le flux d'air induit par infiltration et ventilation.
- l'influence des paramètres tels que le climat, l'étanchéité à l'air.
- le taux et la direction du flux d'air.
- le flux d'air entre deux pièces.
- la concentration des polluants.
- l'impact sur l'énergie.

IV-2) Le principe de fonctionnement de la ventilation

Le débit d'un fluide à travers un trou ou une ouverture est proportionnel à la surface d'ouverture et à la différence de pression maintenue de part et d'autre de l'orifice. Plus l'ouverture est grande, plus l'écoulement est important ; plus la différence de pression est élevée, plus le débit est élevé.

Le débit d'écoulement, ou taux de renouvellement d'air, ne dépend pas seulement des dimensions et du trajet de fuite, mais aussi de l'ampleur et de la direction de la pression exercée.

On distingue quatre systèmes de ventilation :



IV-2-1) Principe de fonctionnement de la ventilation naturelle (système A)

Dans la ventilation naturelle, l'air se déplace grâce aux différences de pression qui existent entre les façades du bâtiment et grâce à la différence de masse volumique de l'air en fonction de sa température. **Des amenées d'air** (grilles et vasistas réglables) doivent être disposées en façade pour les locaux dits "secs" (bureaux, séjours,...) ; **des ouvertures de transfert** (détalonnage des portes ou grilles) permettent le passage de l'air vers les locaux dits "humides" (sanitaires, cuisine,...).

Dans ces derniers, l'air est évacué grâce à **des conduits verticaux** débouchant en toiture (voir figure).

Il est sous-entendu que les espaces de passage (couloirs, halls, escaliers, etc.) sont suffisamment ventilés par l'air qui provient des locaux "secs" et transite par les ouvertures de transfert pour gagner les locaux "humides". Il n'y a donc pas besoin d'amenée d'air ou d'évacuation d'air spécifiques dans les espaces de circulation des maisons unifamiliales.

Par contre, les dispositifs de ventilation sont obligatoires dans les cages d'escalier et couloirs communs des immeubles d'habitation collective, où ils sont considérés comme locaux spéciaux.

Dans un bâtiment, **la sécurité incendie** est assurée par un compartimentage. La ventilation et la distribution de l'air dans les locaux au moyen de gaines doivent être conçues de telle sorte que :

- la fumée et les flammes ne puissent se propager dans tout le bâtiment.
- les éléments de construction traversés par ces gaines conservent leur résistance au feu.

Les avantages de la ventilation naturelle

- Aucune consommation électrique n'est demandée.
- Les éléments de ventilation naturelle demandent très peu d'entretien et ne comprennent pas de ventilateurs bruyants.

Les inconvénients de la ventilation naturelle

- La performance de la ventilation n'est pas garantie : elle dépend des phénomènes naturels du mouvement de l'air.
- L'air neuf n'est pas filtré.
- Les grilles d'amenée d'air peuvent laisser filtrer les bruits extérieurs.
- Les grilles d'ouvertures peuvent engendrer un inconfort.
- Les ouvertures entre les locaux favorisent le passage des bruits gênants.
- Les évacuations doivent se faire par des conduits verticaux
- Les débouchés des conduits d'extraction verticaux doivent se situer près du faîtage.
- Les ouvertures dans les façades sont parfois peu esthétiques.

IV-2-2) Les principes de fonctionnement de la ventilation mécanique

Il existe essentiellement trois types d'installation de ventilation mécanique :

- le système de mise en surpression, dont les ventilateurs d'alimentation en air extérieur conservent la maison à une pression supérieure à la pression extérieure ;
- le système qui utilise des ventilateurs d'extraction et des prises d'air pour maintenir la pression de l'intérieur au-dessous de la pression extérieure ;
- le système dit équilibré qui comporte des ventilateurs d'alimentation et d'extraction, et qui maintient les pressions intérieure et extérieure à peu près au même niveau.

IV-2-2-1) Installation de ventilation à alimentation mécanique (système B)

Dans sa version la plus simple, ce type d'installation suppose la mise en place d'un réseau de conduits de distribution raccordé au ventilateur qui aspire l'air frais de l'extérieur et le distribue dans tout le bâtiment. L'expulsion de l'air se fait par extraction naturelle (voir ventilation naturelle).

L'installation tend donc à pressuriser l'intérieur du bâtiment et à abaisser le plan de pression neutre, PPN. De ce fait, elle diminue la partie de l'enveloppe par où se font les infiltrations, de même que les pressions qui les favorisent.

L'infiltration d'air totale peut donc s'en trouver réduite et elle est éliminée totalement si le PPN se situe sous le plancher du sous-sol. Il y a, par contre, accentuation des pressions intérieures et de la partie de l'enveloppe soumise à l'exfiltration.

Applications :

- dans des sites fortement pollués : l'air amené peut être filtré avant d'être pulsé dans le bâtiment.
- dans des bâtiments industriels où l'air doit être parfaitement "propre".
- pour le contrôle des allergies : lorsque les occupants sont sensibles aux polluants extérieurs.

- dans le cas où il y a un polluant, tel que la mousse isolante d'urée-formol, dans les murs extérieurs. Le maintien de la maison en surpression empêche l'infiltration, dans les locaux habités, de gaz ou de polluants provenant de l'enveloppe.

Limitations :

L'air du bâtiment en surpression s'évacue vers l'extérieur par toutes les ouvertures de l'enveloppe. L'air humide provenant de l'intérieur peut donc pénétrer dans les murs et la toiture où il peut produire de la condensation : des problèmes peuvent alors apparaître, comme les moisissures, la pourriture des matériaux, l'écaillement de la peinture, etc.

Il ne faut donc employer ce moyen de ventilation que dans un bâtiment où l'étanchéité à l'air de l'enveloppe extérieure est élevée. C'est pourquoi ce type d'installation de ventilation n'est pas toujours indiqué dans le cas d'une rénovation où il est difficile de s'assurer que le pare-air en place présente une étanchéité à l'air suffisante à la pressurisation intérieure.

Les avantages de la ventilation à alimentation mécanique

- La simplicité du système.
- La bonne distribution de l'air frais dans tout le bâtiment.
- La surpression diminue les risques de refoulement et d'infiltration des gaz se dégageant du sol ou des matériaux de construction.
- L'air peut être filtré et sa température et/ou son humidité conditionnées.
- Les débits d'air amenés sont contrôlés.
- Une partie de l'air intérieur peut être récupérée et mélangée à l'air extérieur.

Les inconvénients de la ventilation à alimentation mécanique

- Elle favorise la pénétration de l'air humide provenant de l'intérieur dans les murs extérieurs et la toiture.
- Elle ne convient pas toujours dans le cas d'une rénovation.
- Si l'entrée d'alimentation est mal située, mal conçue ou mal placée, l'installation de ventilation peut introduire les bruits extérieurs dans le bâtiment.
- Les ouvertures entre locaux favorisent le passage de bruits.
- Il n'y a pas de récupération de chaleur.
- Les débits d'air extrait ne sont pas contrôlables.
- Les évacuations doivent se faire par des conduits verticaux.
- Les débouchés des conduits d'extraction verticaux doivent se situer près du faîtage.
- L'enveloppe extérieure du bâtiment doit avoir une bonne étanchéité à l'air.
- Elle a besoin d'énergie électrique.
- Elle nécessite une maintenance régulière.

IV-2-2-2) Installation de ventilation à extraction mécanique (système C)

L'extraction mécanique consiste à créer un mouvement de circulation de l'air dans le bâtiment de telle sorte que l'air neuf entre naturellement par les locaux "secs" et que l'air soit ensuite extrait par un ventilateur depuis les locaux "humides" ou "viciés". L'air chemine ainsi à travers plusieurs locaux par

ordre croissant de pollution, en passant sous les portes ou par des grilles de transfert. Une telle installation nécessite :

- que les locaux “humides” ou “viciés” soient mis en dépression par rapport au reste du bâtiment.
- que les ouvertures soient placées en façade pour diffuser de l’air dans les locaux “secs”.
- que le transfert de l’air entre les locaux avec alimentation et les locaux avec extraction soit organisé.

Si le bâtiment est important, il faut le découper préalablement en zones de ventilation distinctes.

Installation de ventilation à extraction mécanique ponctuelle

L’installation expulse l’air au dehors au moyen d’un ou plusieurs ventilateurs d’extraction (ventilateur de salle de bain, hotte de cuisine, etc.), l’alimentation en air se faisant par des prises d’air aménagées à cette fin.

Une dépression a donc tendance à se créer à l’intérieur, et on assiste à un rehaussement du plan de pression neutre PPN.

Selon la hauteur à laquelle celui-ci est relevé, il y a réduction ou élimination totale des exfiltrations. L’élimination est totale lorsque le PPN est élevé au-dessus du plafond du dernier étage chauffé.

Applications

- dans les maisons d’habitation.

Installation de ventilation à extraction mécanique centrale

Ce type de ventilation exige l’installation d’un réseau de conduits, qui raccorde toutes les bouches d’évacuation à un ventilateur central d’une capacité suffisante pour répondre à tous les besoins de ventilation du bâtiment.

Cette installation de ventilation élève aussi le plan de pression neutre et réduit ou élimine les exfiltrations par l’enveloppe du bâtiment.

Applications

- dans des maisons d’habitation ;
- dans des bâtiments de taille moyenne.

Limitations

La ventilation par simple extraction d’air n’est pas adaptée aux bâtiments situés dans des environnements bruyants et/ou pollués.

Les avantages de la ventilation à extraction mécanique

- Elle est peu coûteuse à l’exploitation.
- Elle demande peu de place utile dans les locaux techniques.
- L’évacuation par conduits verticaux n’est plus obligatoire.
- Elle s’applique aux bâtiments neufs et à la rénovation.
- Les débits d’air extraits sont contrôlés.

- La mise au point est facile, se limitant au réglage des débits extraits au moyen des bouches.
- Elle diminue les risques de problèmes d'humidité dans les murs et dans les toitures.
- Une pompe à chaleur peut être intégrée afin de récupérer la chaleur de l'air extrait.

Inconvénients de la ventilation à extraction mécanique

- Elle n'est pas adaptée aux bâtiments situés dans des environnements bruyants et pollués.
- Elle nécessite un réseau de conduits dont il faut intégrer l'encombrement.
- L'air neuf n'est pas filtré.
- Les débits réels d'air neuf sont parfois éloignés des valeurs théoriques (voir ventilation naturelle).
- Les grilles d'ouverture peuvent engendrer un inconfort.
- Les ouvertures entre locaux favorisent le passage de bruits aériens.
- Une simple extraction ne permet pas de réaliser du free cooling car les débits d'extraction sont généralement insuffisants.
- Elle a besoin d'énergie électrique.
- Pendant le fonctionnement des ventilateurs d'extraction, il peut y avoir inversion du tirage ou refoulement des gaz de combustion des appareils de production de chaleur à combustion ouverte (chaudière, feu ouvert, chauffe-eau...).
- Le fonctionnement des appareils peut favoriser l'admission des gaz se dégageant du sol car le bâtiment est mis en dépression : infiltration de radon, d'humidité, etc.
- L'enveloppe extérieure du bâtiment doit avoir une bonne étanchéité à l'air.
- Elle nécessite une maintenance régulière.

IV-2-2-3) Installation de ventilation à alimentation et extraction mécaniques (système D)

L'installation de ventilation à alimentation et extraction mécaniques se compose d'un ventilateur d'alimentation, d'un ventilateur d'extraction et d'un réseau de conduits de distribution et d'évacuation.

La ventilation double flux consiste à organiser :

- la pulsion mécanique de l'air neuf, filtré, dans les locaux.
- l'extraction mécanique de l'air vicié des locaux.

On peut, soit pulser l'air neuf dans les locaux "secs" et extraire l'air vicié depuis les locaux "humides", soit chaque local peut disposer d'une pulsion et d'une extraction. Dans ce cas, les locaux produisant des odeurs sont généralement maintenus en dépression de telle sorte que l'air vicié ne s'échappe pas vers les autres locaux.

La pulsion se distribue via un réseau de conduites verticales et horizontales (dans les faux-plafonds, par exemple). Les conduits d'évacuation d'air sont semblables aux conduits des installations simples flux et peuvent être disposés parallèlement aux conduits d'amenée d'air.

Les bouches d'amenée d'air sont de type mural ou de type plafonnier s'il existe des faux-plafonds dans le local.

Plusieurs compléments à ce type d'installation sont possibles :

- une récupération de chaleur par échange entre l'air extrait et l'air neuf.
- un traitement de l'air en température et en humidité pour assurer un confort optimal.
- un recyclage partiel de l'air, dans le cas où l'air de ventilation assure également le chauffage ou le refroidissement des locaux.

Lorsque ce type d'installation de ventilation fonctionne dans un environnement en équilibre (c'est-à-dire lorsque l'alimentation est égale à l'extraction), il n'influence aucunement la

répartition naturelle des pressions qui s'exercent sur le bâtiment, ni le plan de pression neutre qui n'est ni abaissé, ni relevé.

Toutefois, en raison du milieu ambiant, l'installation fonctionne souvent en léger déséquilibre, donc selon le cas, comme une installation d'extraction ou d'alimentation.

Applications

- Dans des maisons d'habitation si le climat est sévère ;
- Dans des magasins, bâtiments commerciaux, bureaux ;
- lorsque l'environnement est particulièrement bruyant et/ou pollué.

Limitations

Ce type d'installation de ventilation exige une très bonne étanchéité à l'air de l'enveloppe extérieure des bâtiments, sinon les voies naturelles d'infiltration et d'exfiltration court-circuitent l'installation de ventilation mécanique. C'est pourquoi, la mise en œuvre d'un tel système n'est pas aisée dans le cas de bâtiments rénovés où il est plus malaisé d'intégrer des conduits de ventilation.

Les avantages de la ventilation à alimentation et extraction mécaniques

C'est un système très maîtrisable. Quelles que soient les conditions climatiques extérieures, il est possible de :

- capter l'air extérieur à un endroit "sain".
- filtrer l'air.
- contrôler les débits de pulsion et d'extraction.
- mettre à volonté certains locaux en surpression ou en dépression s'il y a pulsion et extraction dans chaque local.
- Elle peut assurer un taux de renouvellement d'air élevé. Par conséquent, on observe :
 - une diminution du niveau d'humidité à l'intérieur.
 - une atténuation de la concentration de polluants.
 - une diminution du danger de refoulement des gaz de combustion.
- Elle induit une très bonne distribution de l'air.
- Elle se prête bien à une commande automatique, ce qui facilite la gestion des débits.
- Elle permet la récupération de chaleur contenu dans l'air extrait pour préchauffer l'air neuf pulsé.
- Si les conduites de distribution sont bien étudiées, les problèmes de transmission de bruit venant de l'extérieur sont limités.
- Aucune ouverture dans l'enveloppe extérieure du bâtiment n'est nécessaire, sauf la prise d'air centralisée et le refoulement.

Les inconvénients de la ventilation à alimentation et extraction mécaniques

- C'est un système coûteux.
- Elle demande de la place dans les locaux techniques.
- Elle est la plus compliquée des installations de ventilation.
- Elle est difficile à équilibrer.
- L'enveloppe extérieure du bâtiment nécessite impérativement une très bonne étanchéité à l'air.
- La pulsion de l'air dans les locaux peut engendrer du bruit, notamment au niveau des bouches de diffusion.

- Elle a besoin d'énergie électrique.
- Elle nécessite une maintenance régulière (inspection et nettoyage).

Isolation thermique