

*Centre Universitaire Abdelhafid Boussouf MILA
Institut : Sciences Et Technologies
Département : Sciences et Techniques
Filière : Génie civil
01 Année MASTER GC-STRUCTURES*

PHYSIQUE DU BÂTIMENT



LECHEHEB. M

Objectif de la matière

Comprendre l'incidence du second œuvre du bâtiment sur la maîtrise du confort et de sécurité intérieure. Prendre la mesure de la complexité du contrôle des ambiances dans le bâtiment.

Contenu de la matière:

Chapitre 1. Isolation phonique :(5 semaines)

Généralités sur le son ; Elément d'acoustique ; Isolation acoustique des locaux ; Différents matériaux isolant ; Réglementation acoustique.

Chapitre 2. Isolation thermique : (8 semaines)

Généralités et définitions ; La chaleur ; Thermique de la paroi ; Calcul des déperditions d'une construction ; Matériaux d'isolation thermique ; Réglementation thermique.

Chapitre 3 : Humidité (2 semaines)

Indices de problèmes d'humidité excessive ; Les Origines ; Les Dégâts ; Définitions ; Prévention et traitement.

Mode d'évaluation:

Contrôle continu: 40% ; Examen: 60%.

Références bibliographiques:

1. A. COIN : *Ossature de bâtiments – EYROLLES.*
2. FISCHETTI A. : *Initiation à l'acoustique, Paris, Belin, 2001, 288p + CD rom*
3. VAL M. : *Acoustique appliquée, Paris, Dunod, 2002, 350p*
4. CHAGUÈ M. : *L'acoustique de l'habitat, Paris, Le Moniteur, 2001, 242 p.*
5. BARET Yves. *Traiter l'humidité (dans la maison ancienne).* Eyrolles, 2007. 79p.
6. " *Energie+, version 8, Architecture et Climat, Université catholique de Louvain (Belgique) 2013, réalisé avec le soutien de la Wallonie - DGO4 - Département de l'Énergie et du Bâtiment Durable. Disponible sur : <http://www.energieplus-lesite.be> "*
7. Yves JANNOT. *AIR HUMIDE.; septembre 2005*
8. SOCOTEC, CSTB. *Performance énergétique : les matériaux et procédés d'isolation. CSTB, 2013. 458p. ISBN-13: 978-2868915719*
9. *Thierry Gallauziaux, David Fedullo. Le grand livre de l'isolation.2009. Livre de Thierry Gallauziaux*

⇒ Gros œuvre et second œuvre

La construction d'un bâtiment est régie par des règles ancestrales qui s'appuient sur des savoirs faire spécialisés de différents métiers, on parle alors de corps d'état du bâtiment.

La construction d'un bâtiment se divise en 2 grandes parties :

- Le gros œuvre
- Le second œuvre

LE GROS ŒUVRE concerne les études de sol, l'acheminement des VRD, le terrassement, la construction des fondations, l'élévation des murs, la réalisation de la charpente et de la couverture, la pose des grosses menuiseries.

Une fois ces différentes opérations effectuées on déclare le bâtiment « hors d'eau et hors d'air ».

PRÉAMBULE

LE RÔLE DU BÂTIMENT HABITÉ

Il est utile de répéter que le rôle premier d'un bâtiment est d'assurer à ses occupants un climat intérieur agréable, et peu dépendant des conditions extérieures, notamment météorologiques et acoustiques. La qualité architecturale participe, à notre avis, aux conditions de confort ou réciproquement, le confort offert par un bâtiment est un des aspects de son architecture.

Les exigences actuelles sont plus restrictives que celle acceptées aux siècles passés. Elles peuvent être classées en plusieurs catégories qui interagissent entre elles: exigences de confort thermique, exigences de qualité de l'air, besoin en éclairage, protection acoustique et exigences en termes de qualité de l'environnement, tant intérieur qu'extérieur.

La satisfaction de besoins de l'occupant est aussi importante que l'aspect esthétique du bâtiment, son intégration au site et sa solidité. L'architecte construit des bâtiments destinés à être occupés. Il contribue, dans une démarche intégrée, à donner au bâtiment sa qualité esthétique, sa solidité, et sa qualité environnementale. Le confort offert par un bâtiment résulte d'abord de la conception architecturale. L'architecte qui laisse à l'ingénieur ou au technicien spécialiste en chauffage, ventilation, climatisation, éclairage, ou acoustique, le soin d'assurer la qualité d'environnement intérieur perd le contrôle de l'intégration, et prend le risque que son œuvre soit dénaturée par les contraintes techniques.

Au moyen d'une planification intelligente et multidisciplinaire, il est parfaitement possible d'assurer à la fois une bonne qualité architecturale, une excellente qualité d'environnement intérieur et une très faible consommation d'énergie

CRITÈRES DE CONFORT :

Les conditions propres à l'individu, qui sont son métabolisme, son activité, son habillement et sa santé, jouent un rôle primordial sur la perception que cette personne aura de son confort. Il convient donc de le reconnaître car l'architecte n'a aucune influence sur ces paramètres.

Conditions thermiques	Températures de l'air et des surfaces environnantes. Sources de rayonnement (radiateurs, soleil, poêles). Perméabilité thermique des surfaces en contact avec le corps.
Qualité d'air	Vitesse relative de l'air. Humidité relative de l'air. Pureté ou pollution de l'air, odeurs.
Acoustique	Niveau de bruit, nuisance acoustique. Temps de réverbération (duré de l'écho).
Optique	Eclairage naturel et artificiel. Couleurs. Volumes intérieurs et distribution des volumes.
Autres influences	Degré d'occupation des locaux. « ambiance ».

CHAPITRE 01 :**ISOLATION PHONIQUE**

Rarement prise en compte par les occupants au niveau du projet de construction ou de rénovation, la performance acoustique de l'isolation est pourtant une forme de confort indispensable. Il faut d'abord bien diagnostiquer de quel bruit l'on veut se protéger et savoir décrypter les étiquettes.

L'isolation phonique, ou isolation acoustique, a pour objectif d'éviter la propagation du bruit

I. Généralités sur le son :**I.1. Introduction :**

Un son est une vibration de l'air, elle-même engendrée par la vibration d'un corps solide. L'onde ainsi créée se propage dans l'espace et rencontre des obstacles qui vont la modifier, la dévier, l'amplifier voire l'absorber.

La propagation rectiligne d'une onde longitudinale dans un milieu homogène (et sans amortissement) est schématisé à la page suivante. On admet que la source sonore vibre de façon sinusoïdale à la fréquence f . Son mouvement est périodique de période T et de pulsation ω . On note y son élongation : $y(t) = a \sin \omega t$

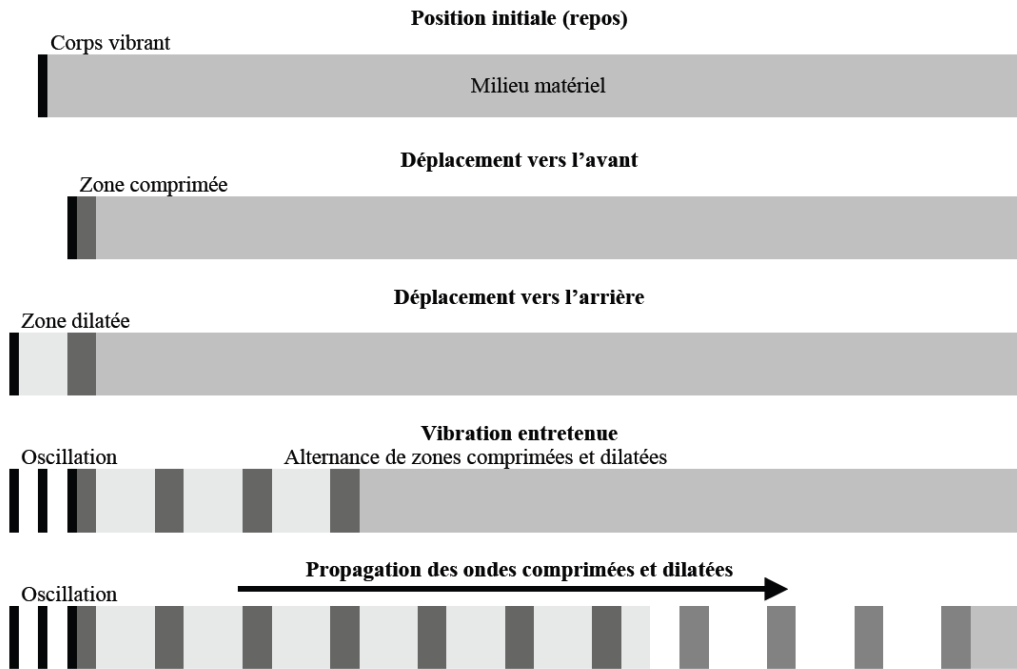
$$T=1/f ;$$

$$f=1/T ;$$

$$\omega T=2\pi \text{ rad}$$

La propagation d'une onde sonore dans un milieu se traduit par l'existence d'une pression acoustique p_{ac} qui s'ajoute à la pression atmosphérique : $p_{ac} + p_{atm} = p_{total}$

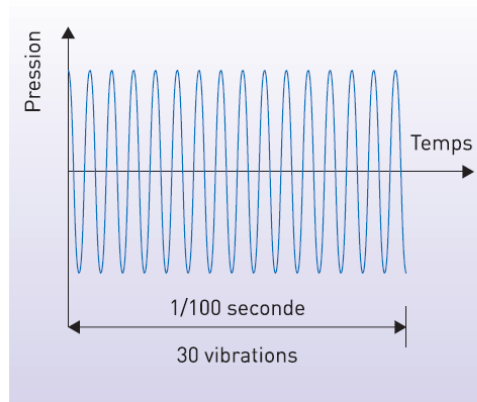
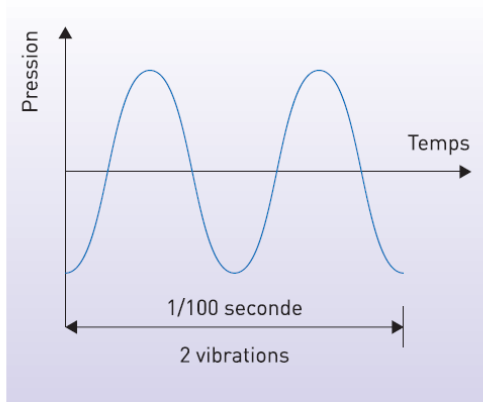
Le déplacement effectué par le son, en une période correspond à une longueur d'onde λ



La vitesse de déplacement de l'onde, dans un milieu non dispersif, ne dépend pas de la fréquence ; dans ce cas, seule la longueur d'onde est caractéristique de l'onde.

$$\lambda = c \times T \quad \text{et} \quad c = \lambda/T \text{ (m/s)}$$

Un son est caractérisé par son **intensité** et sa **fréquence**. Dans la pratique, on rencontre très peu de sons purs (c'est-à-dire une seule fréquence) mais plutôt des sons complexes, qui résultent de la superposition d'un grand nombre de sons purs. Si les sons purs sont répartis en fréquences suivant une série harmonique, leur superposition donne un son « harmonique », à caractère musical. Si la superposition de sons purs donne un phénomène acoustique aléatoire, où l'on ne peut distinguer de fréquences, on est alors en présence de bruit.



Exemple :

$$f = 2 / (1/100) = 200 \text{ Hz}$$

$$f = 30 / (1/100) = 3000 \text{ Hz}$$

La fréquence du son permet de distinguer les sons graves des sons aigus. Elle se mesure en Hertz (Hz). A cette notion physique correspond la notion physiologique de hauteur du son :

plus un son est haut plus il est aigu. L'oreille humaine perçoit des sons dont les fréquences varient entre 16 et 20 000 Hz

I.2. Vocabulaire :

- *Front d'onde : surface virtuelle d'un champ sonore sur laquelle tous les points vibrent en phase.*
- *Une source ponctuelle omnidirectionnelle émet de la même façon, dans toutes les directions de l'espace qui l'entoure.*
- *Le milieu de propagation est isotrope si ses propriétés sont indépendantes de la direction de propagation.*
- *Si le milieu de propagation est homogène et isotrope et si la source est ponctuelle, les fronts d'onde successifs sont des sphères centrées sur la source sonore ; l'onde est, alors, dite sphérique.*
- *L'onde devient une onde plane lorsque les fronts d'onde sont perpendiculaires à la direction de propagation.*

I.3. Célérité du son :

- Célérité du son dans les solides

$$c = \sqrt{\frac{E}{\rho}}$$

E : Module d'Young du solide (N/m^2) (encore appelé « module d'élasticité longitudinale » du solide)

ρ : masse volumique du milieu (kg/m^3).

- Célérité du son dans les liquides

$$c = \sqrt{\frac{K}{\rho}}$$

K : Module de compressibilité isotherme du liquide (en N/m^2 ou en Pa)

- Célérité du son dans les gaz : Loi de Laplace

$$c = \sqrt{\frac{\gamma p}{\rho}}$$

γ : Coefficient de compression adiabatique (sans unité)

p : pression absolue du gaz (Pa)

I.4. Son pur et son complexe :

Une vibration sinusoïdale d'une source sonore engendre un son pur (une seule fréquence).

Un son complexe périodique, de fréquence f , résulte de la somme de sons purs de fréquences $f, 2f, 3f, \dots$. La fréquence f correspond au fondamental. Les autres fréquences correspondent aux harmoniques.

L'analyse spectrale d'un son complexe permet de séparer le fondamental des harmoniques (exemple ci-après).

Exemple : y_{som} : son complexe périodique : $y_{\text{som}} = y_1 + y_2 + y_3$

II. Élément d'acoustique architecturale

II.1. Généralités

Lorsque la source sonore se trouve dans un local, l'énergie sonore est réfléchi sur les parois et vient s'ajouter à l'énergie rayonnée directement par la source.

➤ Coefficient d'absorption d'un matériau :

On appelle coefficient d'absorption α d'un matériau, le rapport :

$$\alpha = \frac{\text{énergie absorbée}}{\text{énergie incidente}} \quad (\alpha \text{ sans dimension})$$

α : dépend de la nature du matériau et aussi de l'angle d'incidence et de la fréquence de l'onde incidente sur la paroi ; on se contente le plus souvent de prendre le coefficient moyen du matériau.

➤ Coefficient d'absorption moyen d'un local :

Si les parois d'une salle sont constituées de n surfaces (S_1, S_2, S_3, \dots) recouvertes de matériaux différents de coefficients d'absorption respectifs ($\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \dots$) le coefficient d'absorption moyen de la salle est :

$$\alpha_{\text{moy}} = \frac{\alpha_1 \times S_1 + \alpha_2 \times S_2 + \alpha_3 \times S_3 \dots}{S_1 + S_2 + S_3 + \dots}$$

➤ Surface d'absorption équivalente :

Le terme $A = \alpha_1 \times S_1 + \alpha_2 \times S_2 + \alpha_3 \times S_3 \dots$ a la dimension d'une surface ; on l'appelle « surface d'absorption équivalente » du local ; en effet, la surface A serait la surface parfaitement absorbante (coefficient d'absorption égal à 1) qui a globalement la même absorption que le local de surface $S = S_1 + S_2 + S_3 + \dots$:

$$A = \sum_i \alpha_i \times S_i = \alpha_1 \times S_1 + \alpha_2 \times S_2 + \alpha_3 \times S_3 + \dots = \alpha_{\text{moy}} \times (S_1 + S_2 + S_3 + \dots).$$

Remarque : Pour un local de grandes dimensions et de volume V, la surface équivalente d'absorption est enrichie d'un terme supplémentaire dû à l'atténuation de l'air

$$A = \sum_i \alpha_i \times S_i + 4mV \quad m : \text{constante d'atténuation de l'air}$$

Remarque : A est parfois appelée « équivalent de fenêtre ouverte ». En effet, pour une fenêtre ouverte, on a en quelque sorte une « absorption » totale par transmission et, par conséquent, un coefficient d'absorption équivalent de 1 !

II.2. L'intensité

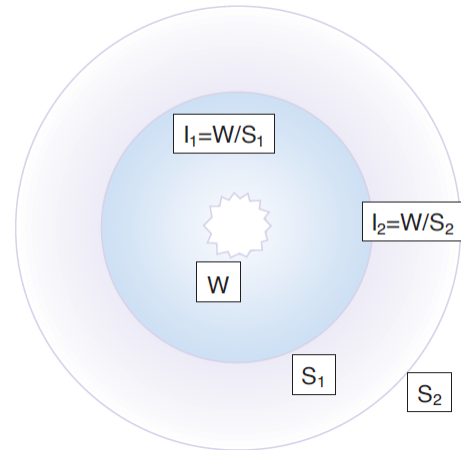
L'intensité acoustique est égale au flux de puissance acoustique traversant l'unité de surface entourant le point d'écoute : avec :

$$I = P/S = W/S, \quad P=W$$

I : intensité acoustique reçue au point d'écoute en W/m^2 .

W : puissance acoustique traversant la surface S en Watt.

S : surface entourant le point d'écoute, et traversée par la puissance W , en m^2 .



Plus on s'éloigne d'une source, plus la surface de l'onde (traversée par la même puissance acoustique émise par la source) grandit, et plus l'intensité reçue diminue.

Plus l'intensité acoustique augmente (ou diminue), et plus la sensation de force sonore augmente (ou diminue). Pour exprimer la sensation de force sonore engendrée par l'ensemble des intensités de sons possibles, on utilise une échelle logarithmique : le décibel (dB). L'oreille humaine perçoit des sons de 0 dB (seuil d'audibilité) à 120 dB (seuil de douleur).

II.2.1. Intensité sonore globale

En chaque point du local, l'intensité sonore globale I est la somme de deux intensités sonores :

➤ L'intensité I_d rayonnée directement par la source de directivité Q :

$$I_d = \frac{QP}{4\pi r^2}$$

La directivité de la source est représentée par un facteur $Q(\vartheta, \varphi)$ (exemple : si la diffusion est hémisphérique, $Q = 2$)

Pour une source ponctuelle omnidirectionnelle $Q=1$ donc : $I_d = \frac{P}{4\pi r^2}$

➤ L'intensité sonore réverbérée qui, elle ne dépend pas de la distance d ; on montre qu'elle est à peu près égale à :

$$I_r = \frac{4P(S - A)}{S \times A} = \frac{4P}{R_L}$$

$$R_L = \frac{S \times A}{S - A} \cong \frac{S \times \alpha_{moy}}{(1 - \alpha_{moy})} \text{ si on néglige le terme d'atténuation dû à l'air.}$$

L'intensité sonore résultante s'écrit :

$$I = I_d + I_r = \frac{QP}{4\pi r^2} + \frac{4P}{R_L}$$

II.3. Les niveaux sonores : en dB (décibel)

➤ Niveau de pression

La pression la plus faible à laquelle l'oreille humaine soit sensible (à 1000 Hz) est choisie, usuellement, comme référence des pressions

$$L_p = 10 \log \frac{p_e^2}{p_0^2} = 20 \log \frac{p_e}{p_0}$$

p_e : pression acoustique correspondant au son étudié (Pa) (valeur efficace)

p_0 : pression acoustique de référence égale à 2×10^{-5} Pa

➤ Niveau d'intensité sonore

Le niveau d'intensité sonore est noté L_I (L pour Level) ou N (N pour Niveau) :

$$L_I = 10 \log \frac{I}{I_0} = L_W + 10 \log \left(\frac{Q}{4\pi r^2} + \frac{4}{R_L} \right) \quad \text{Avec} \quad L_W = 10 \log \frac{P}{P_0}$$

I_0 : intensité sonore de référence égale à 10^{-12} W/m²

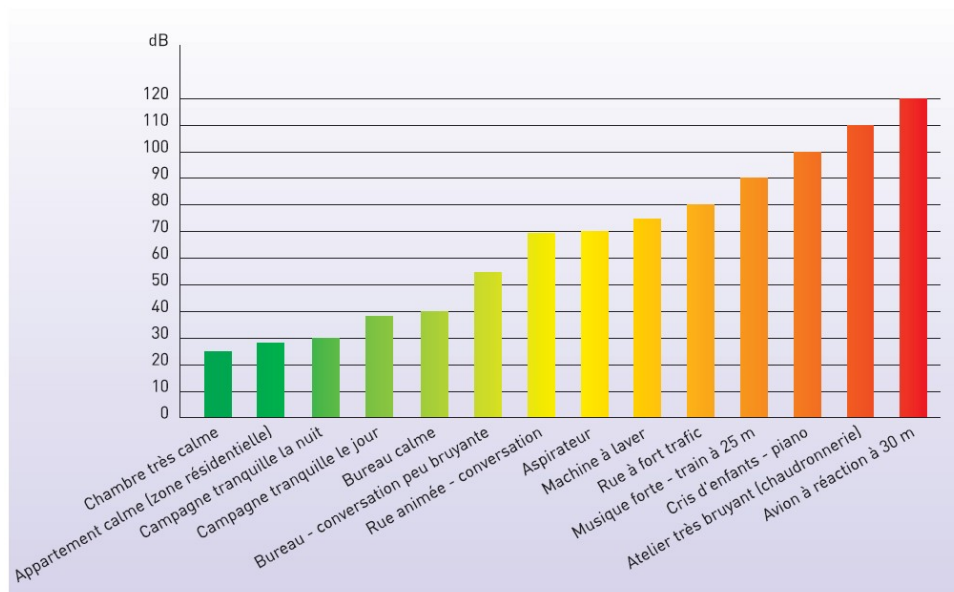
➤ Niveau de puissance acoustique

Le niveau de puissance acoustique (L_W) est rapportée à une puissance de référence P_0 :

$$L_W = 10 \log \frac{P}{P_0} = 10 \log \frac{W}{W_0}$$

$P_0 = 10^{-12}$ W car $I_0 = P_0 / 1 \text{ m}^2$

➤ Quelques ordres de grandeur :



II.4. Théorie de la réverbération

La réverbération est la superposition de l'onde sonore directe et des ondes réfléchies arrivant successivement au point d'écoute. Les parois des obstacles rencontrés (murs, mobiliers, personnes, etc.) absorbent une partie de l'énergie acoustique émise, ce qui constitue la raison majeure de l'affaiblissement des ondes sonores.

La maîtrise de la réverbération d'un local par la correction acoustique réduit le niveau sonore d'un bruit émis dans ce même local ou améliore les qualités d'écoute du local.

II.4.1. Temps de réverbération d'un local

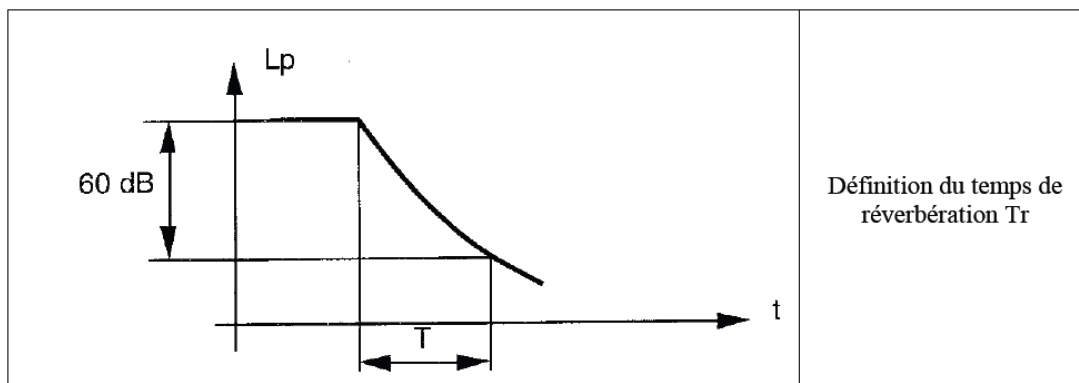
Lorsqu'on coupe brutalement l'émission d'une source sonore dans un local fermé, on constate que le son ne s'éteint que progressivement: on dit qu'il y a trainage. Il faut un certain temps pour que l'énergie acoustique emmagasinée dans le local se dissipe, du fait des réflexions sur les parois (phénomène de réverbération).

La durée de réverbération est d'autant plus longue que:

- Les parois ou leurs revêtements sont peu absorbants;
- Les surfaces traitées sont petites;
- Le volume du local est grand (c'est-à-dire que la distance moyenne à parcourir entre chaque réflexion, appelée libre parcours moyen, est grande).

Par *définition*, la durée de réverbération correspond au temps nécessaire pour qu'après l'arrêt d'une source sonore, l'intensité acoustique décroisse de 60 dB

T_r et s'exprime en secondes.



II.4.2. Formule d'Eyring :

$$T_r = \frac{-0,161 \times V}{S \times \ln(1 - \alpha)}$$

V : volume du local

S : surface totale des parois du local

α : coefficient d'absorption moyen des parois

II.4.3 Formule de Sabine

A partir de nombreux résultats expérimentaux, Sabine a proposé en 1895 une formule permettant de calculer la durée de réverbération:

$$Tr = \frac{0,16 \times V}{A}$$

V : volume du local

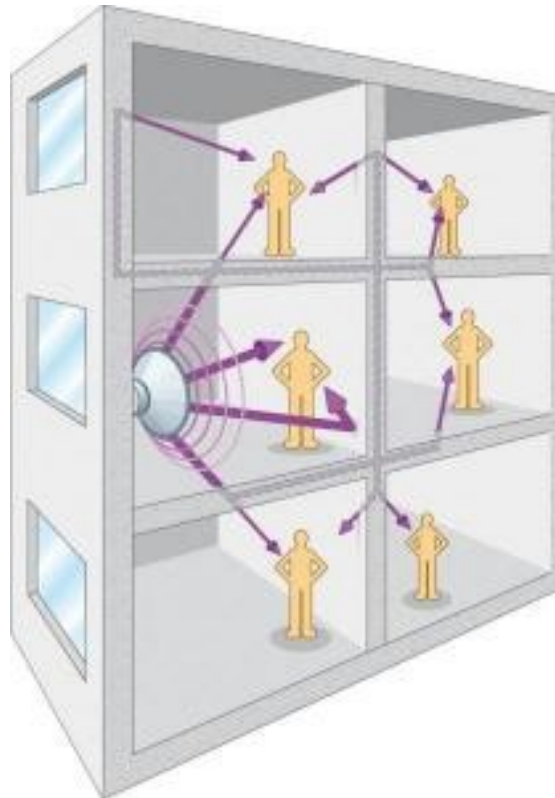
A = S x α : surface d'absorption équivalente du local

S : surface totale des parois du local

α : coefficient d'absorption moyen des parois

Remarque : la formule de sabine est réservée aux petites valeurs de α. (dans ce cas les deux formules sont équivalentes).

III. Isolation acoustique des locaux :

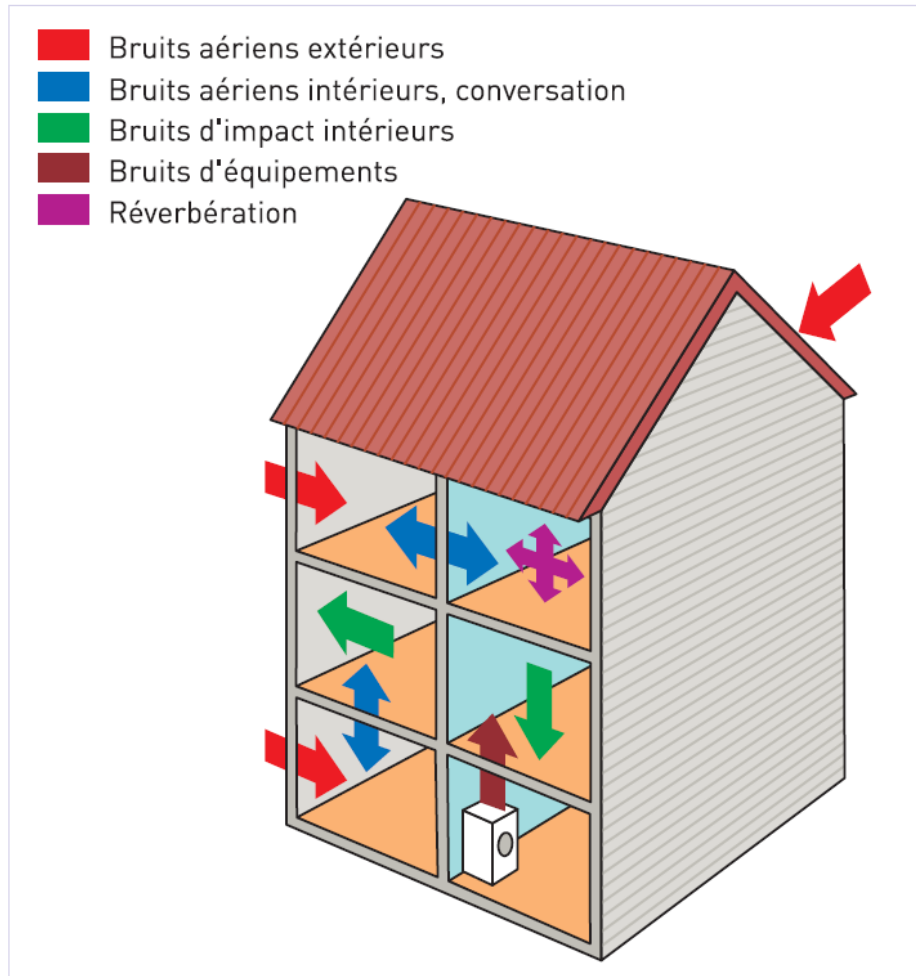


III.1. Introduction :

Les réglementations acoustiques dans le bâtiment visent à obtenir une ambiance sonore de qualité et imposent une maîtrise des seuils à respecter pour :

- La réverbération des locaux.
- L'isolement aux bruits aériens et aux bruits d'impact entre pièces.
- L'isolement de l'enveloppe vis-à-vis des bruits de l'espace extérieur.
- Le bruit des équipements techniques.

Pour ces derniers, on observe habituellement que les équipements dont on a l'usage sont ressentis comme moins gênants que les équipements individuels exclusivement utilisés par les voisins. Les exigences réglementaires concernant le bruit des équipements en tiennent compte.



Association entre bruits et mesures :

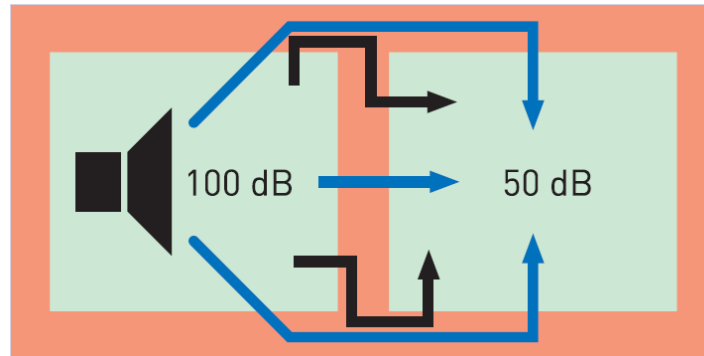
- **Bruit aérien extérieur** : bruit créé par le trafic routier, ferroviaire ou aérien (mesures d'isolement des façades par rapport à un bruit route).
- **Bruit aérien intérieur** : bruit créé par les conversations, la télévision (mesures d'isolement entre locaux par rapport à un bruit rose).
- **Bruit d'impacts (ou de chocs)** : bruit créé par le déplacement des personnes, des meubles ou la chute d'objets (mesure du niveau de bruit de chocs reçu avec une machine à chocs normalisée).
- **Bruit d'équipement** : bruit créé par les ascenseurs, la robinetterie, la VMC... (mesure du niveau de bruit d'équipement en fonctionnement normal).
- **Réverbération** : effet de résonance d'un local (mesure de la durée de réverbération).

III.2. Isolement brut D_b

Soit L_1 et L_2 les niveaux de l'intensité moyen des bruits respectivement dans le local émission et dans le local réception respectivement. L'isolement acoustique brut D_b est défini par la différence arithmétique :

$$D_b = L_1 - L_2$$

Exemple : Emission de 100 dB, réception de 50 dB : isolement $D = 50$ dB



L'expérience montrant que Db est indépendant de la puissance de la source, mais qu'il varie avec forme du spectre du bruit émis, les mesures se font par bandes de fréquences (octaves ou tiers d'octave).

L'isolement brut Db est une mesure informant la situation réelle d'écoute, dans des conditions données.

Il ne présente aucune correction et intéresse donc l'ensemble des facteurs qui caractérisent ces conditions.

En particulier, Db dépend de la sonorité du local réception à un certain moment. Cette sonorité, qu'exprime la mesure de la durée de réverbération du local à différentes fréquences, dépend du pouvoir absorbant des parois du local (et des objets qu'il contient).

Comme on effectue souvent les mesures d'isolement dans des locaux vides, il faut pouvoir en déduire l'isolement correspondant à un local normalement meuble.

Il faut donc définir un nouvel isolement, qui réponde à une durée de réverbération unique de référence notée T_0 pour tous les locaux, soit en matière d'habitat $T_0 = 0,5s$, quelle que soit la fréquence (situation ordinaire d'un local normalement meuble).

Cet isolement est appelé isolement normalisé D_n

III.3. Isolement normalisé D_n

Comme L_2 augmente quand le pouvoir absorbant des parois diminue, D_b diminue avec ce dernier; puisque la durée de réverbération varie en sens contraire du pouvoir absorbant, D_b décroît quand le T_2 du local croît. Si l'on admet que la relation entre T_2 et l'intensité du son est linéaire, la correction apportée à L_2 , pour simuler la situation d'un local normalement meuble, sera telle que:

$$D_n = D_b + 10 \log \frac{T_2}{T_0} = D_b + 10 \log \frac{T_2}{0.5} = L_1 - L_2 + 10 \log \frac{T_2}{0.5}$$

III.4. Indice d'affaiblissement d'une paroi R

➤ Définition de l'indice d'affaiblissement R

On caractérise la performance d'isolement acoustique d'une paroi par son facteur de transmission τ qui est le rapport entre la puissance acoustique incidente reçue par la paroi et la puissance acoustique transmise par la paroi.

$$\tau = \frac{W_t}{W_i} = \frac{\tau_1 \times S_1 + \tau_2 \times S_2 + \tau_3 \times S_3 \dots}{S_1 + S_2 + S_3 + \dots}$$

L'indice d'affaiblissement R d'une paroi est défini par la relation :

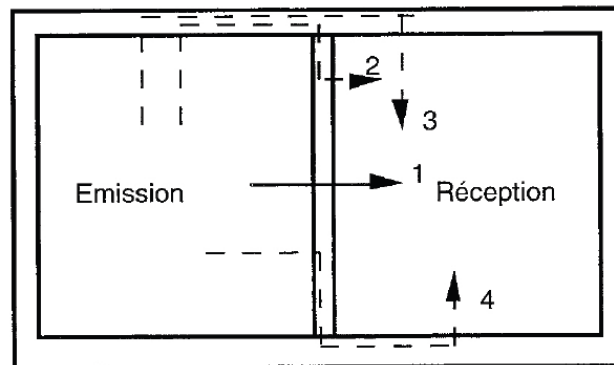
$$R = 10 \log \frac{1}{\tau}$$

➤ Relation entre R et Db

Dans le domaine de l'isolation acoustique, les constructeurs d'immeubles d'habitat neufs doivent satisfaire à des obligations de résultats. Il est donc utile de disposer de méthodes de calculs simples permettant de prévoir les prestations à mettre en œuvre, en évaluant les isolements acoustiques correspondants.

La méthode d'évaluation des isolements acoustique la plus utilisée actuellement consiste à calculer la de

Transmission directe par la paroi de séparation connaissant son indice d'affaiblissement acoustique R, et à évaluer globalement l'ensemble des transmissions indirectes ou transmissions latérales.



$$Db = L1 - L2 = R + 10 \log \frac{A_2}{S_p}$$

avec : S_p surface de la paroi testée

A : aire d'absorption du local de réception

III.5. Paroi double :

Une paroi double comporte deux parois situées à une certaine distance d l'une de l'autre afin qu'il n'y ait pas de liaison entre elles ; de l'air sépare les deux parois.

III.5.1. Règles de construction d'une double paroi

- les deux parois ne doivent pas avoir les mêmes fréquences de résonance ni la même fréquence critique pour ne pas ajouter leurs défauts. Si elles sont constituées du même matériau, elles ne devront pas avoir la même épaisseur.
- on cherche à diminuer l'élasticité et à augmenter l'amortissement de chaque paroi en soignant particulièrement leur maintien en périphérie.
- la distance séparant les deux parois est au moins égale à 10 cm afin de réduire le couplage entre les deux parois.
- il n'est toléré aucun « pont phonique » comme des clous, ou du ciment entre les deux parois.

Une paroi composée de n éléments de surface S_i et d'indice d'affaiblissement R_i aura l'indice d'affaiblissement moyen R_m défini par :

III.5.2. Calculs de l'indice d'affaiblissement d'une double paroi

$R_1 = -10 \log \tau_1$: indice d'affaiblissement de la paroi 1

$R_2 = -10 \log \tau_2$: indice d'affaiblissement de la paroi 2

R : indice d'affaiblissement théorique total de la double paroi :

$$R = R_1 + R_2 \quad \text{ou} \quad \tau_{total} = \tau_1 \times \tau_2$$

Remarque : En fait, l'addition des indices d'affaiblissement ne serait vraie que si les deux parois étaient très éloignées l'une de l'autre, le couplage serait alors pratiquement nul et les deux isolements s'additionneraient !

Pour un double paroi, dans les faits, et si les règles énoncées ci-dessus sont bien respectées, l'isolément d'une double paroi peut être estimé par la formule empirique suivante :

$$R = R_1 + 0,6 R_2$$

IV. Différents matériaux isolant

Quelle que soit l'application, on optera pour un isolant à structure poreuse, tel qu'un matelas fibreux emprisonnant de l'air immobile par exemple, pour « piéger » et amortir le bruit. Cette structure devra être suffisamment souple pour jouer le rôle attendu suivant l'isolation recherchée (isolation aux bruits aériens, aux bruits d'impact, ou correction acoustique) et suffisamment rigide pour assurer un bon comportement mécanique des parois.

IV.1. ETAPES DU CHOIX DES MATERIAUX ACOUSTIQUES

1. Adopter une stratégie acoustique appropriée au type de bruit (aérien, d'impact ou technique) à atténuer, son volume et sa longueur d'onde et des fonctionnalités/destinations du bâtiment existant
2. Choisir les matériaux à écobilan favorable, sur la base de leur rôle dans l'ensemble acoustique

IV.2. STRATEGIES DE PERFORMANCE DES ELEMENTS D'ISOLATION ACOUSTIQUE

Réduire la transmission sonore d'un local à un autre consiste à limiter la transmission d'énergie acoustique grâce à un système ou une paroi isolante dans laquelle chaque produit aura à chaque fois un rôle bien précis

On distingue trois rôles: **atténuateur, ressort et amortisseur**, chacun étant plus ou moins prépondérant en fonction:

- de la nature du montage de la paroi considérée,
- des caractéristiques intrinsèques de l'isolant.

La structure, la répartition des fibres ainsi que la qualité du process industriel déterminent l'efficacité de l'isolant.

La masse volumique n'est pas une caractéristique déterminante dans bon nombre de cas.

IV.3. Les différents isolants ou absorbants phoniques :

La laine de roche



La structure ouverte et enchevêtrée de la laine de roche dissipe naturellement l'énergie sonore : elle est très performante pour lutter contre l'ensemble des bruits aériens, les bruits de choc ou les bruits d'équipements à l'intérieur des domiciles et à l'extérieur. La laine de roche existe sous un grand nombre de formes : En flocons, en rouleaux, en panneaux semi-rigides et rigides, nus et revêtus, en panneaux mono et double densité, pour tous les types d'ouvrage.

La laine de verre



La laine de verre est un très bon isolant acoustique, elle isole bien du bruit. Elle est souvent conditionnée en plaques ou rouleaux elle est l'isolant le plus couramment utilisé pour les planchers de greniers. Ses qualités principales sont son pouvoir isolant, mais aussi le fait qu'elle résiste au feu. La laine de verre étant fabriquée avec des produits naturels et abondants voire des produits en verre recyclés, elle est parmi les matériaux d'isolation les moins chers du marché. Sa durée de vie est prévue en général de l'ordre de 50 ans sans aucun problème d'entretien.

Le chanvre



Le chanvre se trouve sous forme de rouleaux, de panneaux semi-rigides ou en vrac, cet isolant appelé laine de chanvre est utilisé pour l'isolation des murs, des toitures et des planchers. Dans sa forme en vrac, la laine de chanvre peut s'écraser dans le temps, il vaut donc mieux s'en servir pour le traitement des parties horizontales de l'habitat. Comme tous les isolants d'origine végétale, la laine de chanvre est sensible au feu. Le chanvre atténue énormément la transmission et la réverbération des ondes sonores les plus diverses. C'est un bon isolant phonique. Sa culture reste écologique, son utilisation a donc moins d'impact sur l'environnement.

La ouate de cellulose



La ouate de cellulose est utilisée pour une isolation phonique en vrac sur des planchers de combles, murs et toitures ou encore dans les cloisons. Elle est traitée au sel de bore et silicates, elle est protégée des insectes, des moisissures et ignifugée. La ouate de cellulose provient du recyclage du papier. Elle existe aussi en panneaux. La ouate est un excellent choix d'isolant phonique.

Il existe de nouveaux isolants moins connus qui donnent de bons résultats en matière acoustique :

- Les PIV (panneaux isolants sous vide) et les aérogels
- Le liège, les fibres de bois, les fibres de coco et la toiture végétalisée, ainsi que dans les minéraux les argiles expansés, la perlite, la vermiculite, le verre cellulaire, la mousse phénolique donnent aussi de bons résultats.

V. Réglementation acoustique

Il s'agit d'une obligation de résultat in situ (exprimé en dB), c'est-à-dire une fois le local ou le logement terminé par des isolements mesurés sur site. Ceci implique qu'il ne faut pas confondre les caractéristiques des produits et les performances des systèmes qui eux, sont mesurés en laboratoire.

Une maison individuelle indépendante est uniquement soumise par la réglementation à un isolement par rapport aux bruits aériens extérieurs (trafics routier, ferroviaire, aérien...). Il n'y a pas d'exigence pour les cloisons intérieures ou les planchers. Cela suppose de prendre en compte et d'assurer le confort acoustique (Isolation entre une chambre et un séjour par exemple) indépendamment de la réglementation (affaiblissements insuffisants en termes de confort).

Des maisons individuelles jumelées, mitoyennes ou en bande, doivent répondre d'une part à un isolement par rapport aux bruits de route et d'autre part vis-à-vis des bruits aériens ou d'impact pouvant être transmis d'un logement à un autre (par les murs de façade, les murs de séparation, les planchers s'ils sont filants). On se retrouve alors avec les mêmes contraintes qu'un immeuble collectif.

➤ Les indices des bâtiments mesurés sur site :

Isolement acoustique standardisé pondéré aux bruits aériens, DnT,A exprimé en dB.

Niveau de pression pondéré du bruit de choc standardisé, $L'nT,w$ exprimé en dB.

➤ Les exigences de la réglementation acoustique

En résumé, les exigences minimales ont principalement défini :

- l'isolement aux bruits extérieurs : $DnTA$ 30 dB
- l'isolement aux bruits intérieurs : $DnTA$ 53, 55 ou 58 dB selon la nature des pièces
- les bruits d'impact reçus : $Ln1T,w$ 58 Db

Les exigences d'isolations aux bruits extérieurs

La réglementation pour les bâtiments neufs fixe un niveau d'isolement de façade.

Elle prend en compte des minima d'isolation en façade à respecter en fonction du niveau sonore subi.

Cinq catégories existent selon le niveau du bruit environnant:

Catégorie de l'infrastructure	Niveau sonore L de référence en dB de 6h à 22h.	Niveau sonore L de référence en dB de 22h à 6h.	Distance maximale des secteurs affectés	Isolement minimal $D_{nT,A,r}$
1	$L > 81$	$L > 76$	$D = 300$ m	45 dB
2	$76 < L \leq 81$	$71 < L \leq 76$	$D = 250$ m	42 dB
3	$70 < L \leq 76$	$65 < L \leq 71$	$D = 100$ m	38 dB
4	$65 < L \leq 70$	$60 < L \leq 65$	$D = 30$ m	35 dB
5	$60 < L \leq 65$	$55 < L \leq 60$	$D = 10$ m	30 dB

Les exigences d'isolations aux bruits intérieurs

Il faut distinguer les exigences de résultats de la Nouvelle Réglementation Acoustique (NRA), du Label Qualitel et du Label Qualitel Confort Acoustique (LQCA).

Nature du local d'émission		Isolement normalisé aux bruits aériens exprimés en dB					
		Pièces principales			Cuisines et salles d'eau		
		NRA	LQ	LQCA	NRA	LQ	LQCA
Toutes pièces à l'exclusion des garages individuels		$D_{nT,A} \geq 53$		$D_{nT,A} \geq 55$ $D_{nT,A} \geq 58^*$		$D_{nT,A} \geq 50$	
Circulations communes	Avec porte palière	$D_{nT,A} \geq 40$		$D_{nT,A} \geq 45$		$D_{nT,A} \geq 37$	
	Sans porte palière	$D_{nT,A} \geq 53$		$D_{nT,A} \geq 55$		$D_{nT,A} \geq 50$	
Garages collectifs ou individuels			$D_{nT,A} \geq 55$			$D_{nT,A} \geq 52$	
Locaux d'activité			$D_{nT,A} \geq 58$			$D_{nT,A} \geq 55$	

* L'exigence de 55 dB s'applique aux logements collectifs et celle de 58 dB aux maisons individuelles non isolées.

Nature du local d'émission		Niveau d'évaluation aux bruits d'impacts pour la pièce principale de réception exprimé en dB		
		NRA	LQ	LQCA
Logements	Dépendances		$L'_{nT,W} \leq 58$	
	Pièces principales	$L'_{nT,W} \leq 58$	$L'_{nT,W} \leq 55$	$L'_{nT,W} \leq 52$
Circulations communes / Locaux d'activité			$L'_{nT,W} \leq 55$	

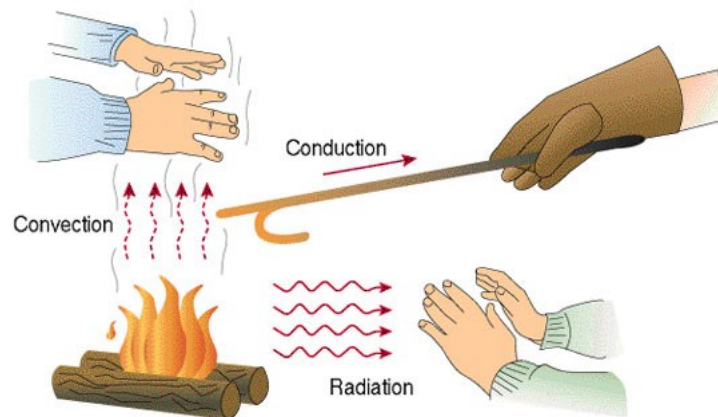
Conclusion

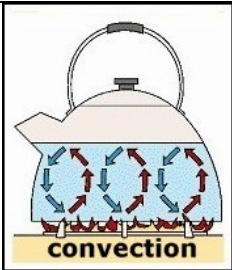
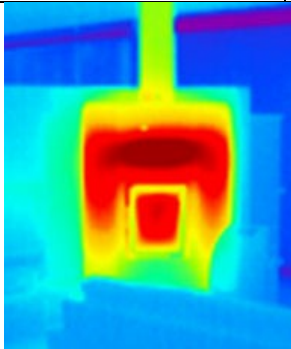
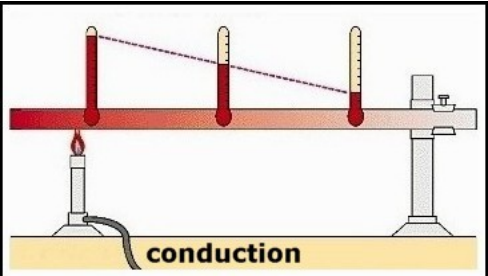
Pour réussir votre chantier acoustique, 5 étapes sont à respecter :

- 1) identifier la nature des bruits (aériens intérieurs ou extérieurs, d'impact, d'équipements) ;
- 2) repérer l'origine du bruit, la ou les voies (parois) par lesquelles il est transmis et repérer la ou les parois à traiter ;
- 3) évaluer l'intensité du bruit perçu (en dB), définir le niveau de bruit maximum acceptable pour son local ou logement et par différence définir le gain d'isolement à apporter ;
- 4) identifier la nature des parois existantes à traiter (parpaings ou briques creux, béton, cloisons alvéolaires, carreaux de plâtre, plancher bois ou plancher hourdi, etc.) ;
- 5) choisir la solution et la performance adaptées en fonction de la nature de la paroi.

CHAPITRE 02 :**ISOLATION THERMIQUE****1. Définitions :****Les modes de transfert de chaleur**

Il existe 3 modes de transfert thermique :



	Convection	Rayonnement	Conduction
Principe	Déplacement de matière et donc de chaleur suivant le principe d'Archimède	Transport d'énergie par le biais du champ électromagnétique	Vibrations ou chocs dans la matière (molécules et électrons) se propageant de proche en proche des milieux chauds vers les milieux froids
<i>Vide</i>	Non	Oui	Non
<i>Solide</i>	Non	Oui, si transparent	Oui
<i>Fluide</i>	Oui	Oui, si transparent	Oui
			

- **La Conduction**

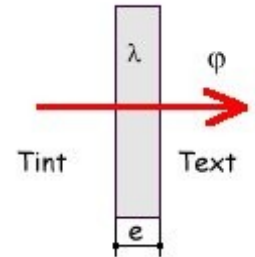
C'est la transmission d'énergie de proche en proche dans la partie solide d'un matériau. La chaleur se propage avec plus ou moins de facilité suivant la nature, les caractéristiques (résistances thermiques...)

Les trois facteurs qui interviennent sur le flux de chaleur traversant 1 m² de paroi sont :

- l'écart de température de part et d'autre de la paroi $\Delta T = T_{int} - T_{ext}$

- l'épaisseur e de la paroi.

- la conductivité thermique λ (en W/m°C) du matériau (plus le matériau est isolant plus λ est petit).



La densité de flux thermique (ou flux thermique surfacique) c'est le flux thermique par unité de surface. La densité de flux thermique s'exprime en watt par mètre carré (W.m⁻²).

$$\varphi = \Delta T \cdot \frac{\lambda}{e} = \frac{\Delta T}{R} \left(\frac{W}{m^2} \right)$$

Si la densité de flux est uniforme sur la surface considérée :

$$\varphi = \frac{\Phi}{S} \text{ (W)}$$

- **La Convection**

Ce mécanisme de transfert de chaleur est propre aux fluides (gaz ou liquide). Au contact d'un élément chaud le fluide, de l'air par exemple, se met en mouvement et se déplace vers l'élément froid au contact duquel il perd sa chaleur créant ainsi un mouvement vertical qui accélère les échanges thermiques entre les 2 éléments.

Expression du flux de chaleur en convection (Loi de Newton) :

Pour un écoulement à une température T_{∞} autour d'une structure à une température uniforme T_s de surface S , l'expression du flux de chaleur en convection est la suivante :

$$\Phi = h \cdot S (T_s - T_{\infty})$$

Où h est le coefficient d'échange thermique

- **Le Rayonnement**

C'est le transfert de chaleur d'un élément à un autre par onde électromagnétique sans contact direct. Ce type de transfert ne nécessite pas de support matériel il peut se produire même dans le vide.

La loi de Stefan-Boltzmann (ou loi de Stefan) permet de quantifier ces échanges. La puissance rayonnée par un corps est donnée par la relation :

$$P = \epsilon S \sigma T^4$$

Avec

σ : constante de Stefan-Boltzmann ($5,6703 \cdot 10^{-8} \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-4}$);

ϵ : émissivité, indice valant 1 pour un corps noir et qui est compris entre 0 et 1 selon l'état de surface du matériau ;

S : superficie du corps ;

T : température du corps (en kelvin).

Si le corps récepteur réfléchit certaines longueurs d'ondes ou est transparent à d'autres, seules les longueurs d'onde absorbées contribuent à son équilibre thermique. Si par contre le corps récepteur est un corps noir, c'est-à-dire qu'il absorbe tous les rayonnements électromagnétiques, alors tous les rayonnements contribuent à son équilibre thermique.

Isolation thermique : terme générique utilisé pour décrire le processus de réduction du transfert de chaleur au travers d'un système, ou pour décrire le composant ou système qui est performant pour cette fonction.

L'isolation thermique peut être réalisée à l'aide d'un **matériau**, d'un **produit** ou d'un **système isolant**.

Matériau isolant thermique : substance ou mélange de substances dont les propriétés d'isolation résultent de sa nature chimique et/ou de sa structure physique.

Produit isolant thermique : matériau d'isolation thermique prêt à l'emploi y compris parements ou enduits.

Système d'isolation thermique : association de deux ou plusieurs composants dont l'un au moins est un produit ou un matériau isolant. La performance du système est la performance de l'ensemble.

Isolant thermique : matériau, produit ou système qui réduit par sa présence le transfert de chaleur à travers la paroi sur, ou dans, laquelle il est placé. Il est caractérisé par sa **résistance thermique** (exprimée en $m^2 \cdot K \cdot W^{-1}$)

La chaleur spécifique:

La relation fondamentale

$$\Delta Q = m \cdot c_p \cdot \Delta T$$

Exprime que, si un corps de masse m stocke ΔQ joules, sa température s'élèvera de ΔT .

c_p , la chaleur spécifique (en $J/(kg \cdot K)$) est une propriété physique des matériaux et elle dépend généralement de la température. Elle caractérise sa capacité à emmagasiner de la chaleur. La chaleur spécifique d'une substance est fonction de sa structure moléculaire et de sa phase.

La conductivité thermique :

Matériau	λ en $W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$
Polyuréthane	0,025
air	0,026
Polystyrène expansé	0,04
Laine de coco	0,05
Liège expansé	0,05
Panneaux de fibre de	0,05

Est la quantité d'énergie traversant 1 m² de matériau d'un mètre d'épaisseur, et pour une différence de 1 degré de température.

Elle s'exprime en w/(m.k).

Elle représente l'aptitude du matériau à se laisser traverser par la chaleur. C'est une caractéristique constante intrinsèque aux matériaux homogènes.

bois	
Laine de roche	0,038 à 0,047
Laine de verre	0,034 à 0,056
Bois de sapin	0,13
Béton cellulaire	0,16 à 0,24
Placoplatre	0,46
Verre	1,2
acier	46 à 52
Cuivre	386

Résistance thermique

La résistance thermique d'un matériau caractérise sa capacité à ralentir le transfert de chaleur réalisé par conduction. Elle s'exprime m².k/w.

Elle est calculée avec la formule suivante : $R = \frac{e}{\lambda}$

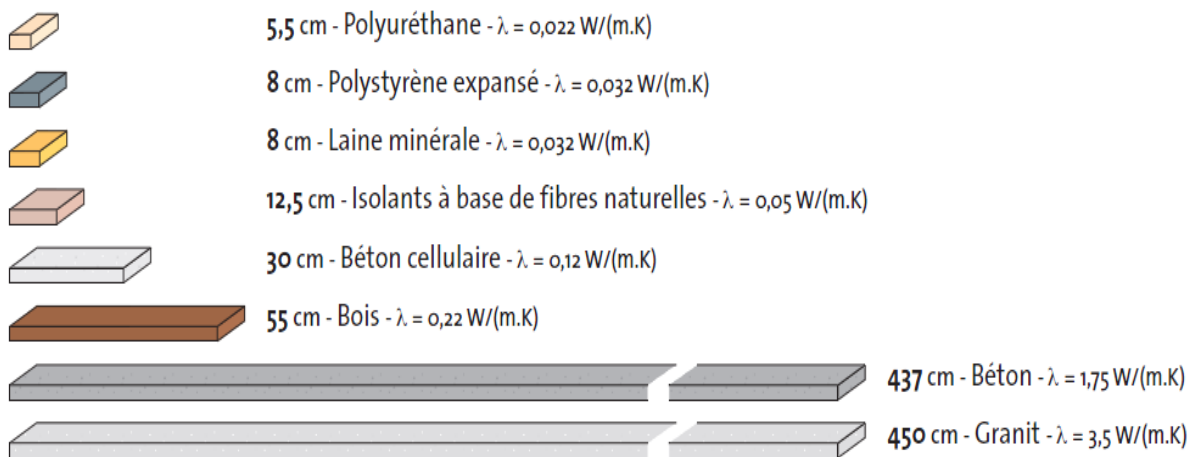
Où :

e est l'épaisseur en mètres

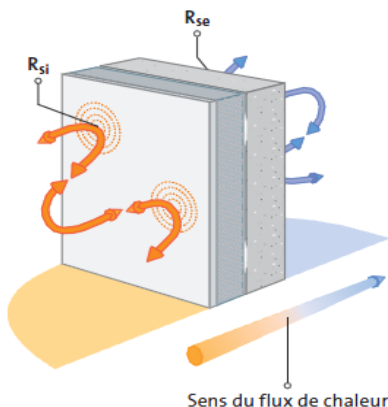
Lambda est la conductivité thermique en W.K⁻¹.m⁻¹

R est la résistance thermique en K.m².W⁻¹

Epaisseur équivalente pour obtenir avec différent matériaux une résistance thermique de R= 2,5 m².K/W



La résistance superficielle d'une paroi : R_{se} et R_{si}

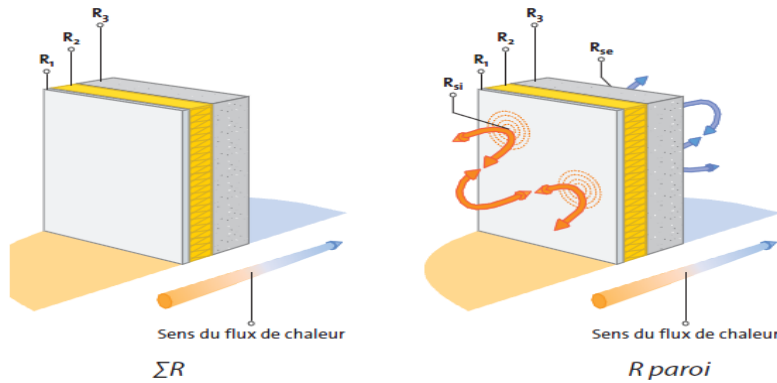


La résistance superficielle d'une paroi caractérise la part des échanges thermiques qui se réalise à la surface des parois par convection et rayonnement. Elle dépend du sens du flux de chaleur et de l'orientation de la paroi ; R_{si} pour les échanges sur la surface de paroi interne et R_{se} pour les échanges sur la surface de paroi externe. Elle s'exprime en m².k/w.

Parois opaques	R_{si}	R_{se}	ΣR_s
Paroi verticale	0,13	0,04	0,17
Paroi horizontale (flux ascendant)	0,10	0,04	0,14
Paroi horizontale (flux descendant)	0,17	0,04	0,21

Parois vitrées	R_{si}	R_{se}	ΣR_s
Paroi verticale (flux horizontal)	0,13	0,04	0,17
Paroi horizontale (flux ascendant)	0,10	0,04	0,14

La résistance thermique d'une paroi homogène : R_{paroi}



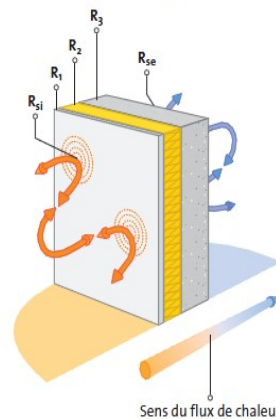
La résistance thermique totale d'une paroi homogène caractérise la somme des transferts de chaleur réalisés par la conduction au sein des matériaux et des échanges thermiques superficiels réalisés par convection et rayonnement.

Elle se calcule en additionnant les résistances thermiques des différents constituants de la paroi et les résistances superficielles correspondantes et s'exprime en $m^2.k/w$.

$$R_{paroi} = \sum R + R_{Si} + R_{Se}$$

La déperdition thermique d'une paroi en partie courante : U_c

Le coefficient de transmission thermique d'une paroi homogène U_c traduit la quantité de chaleur s'échappant au travers d'une paroi homogène de $1m^2$ pour un différentiel de 1 degré. Il s'obtient par le calcul, c'est l'inverse de la résistance thermique totale d'une paroi homogène et s'exprime en $w/(m^2.k)$.



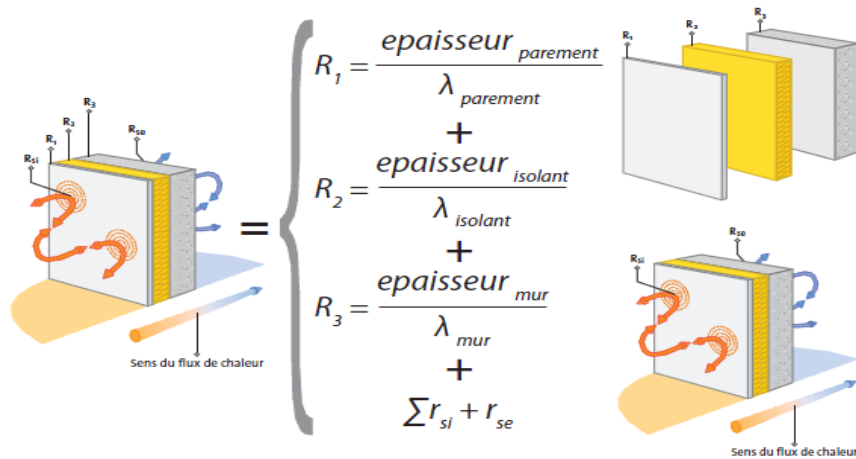
Il sert à caractériser les déperditions thermiques d'une paroi homogène composée d'un matériau simple ou de plusieurs matériaux.

$$U_c = \frac{1}{\sum R + R_{Si} + R_{Se}}$$

Avec :

R : les résistances thermiques des éléments de la paroi homogènes en $m^2.k/w$

Rsi et Rse : les résistances thermiques superficielles de la paroi en $m^2.k/w$



La déperdition thermique dans une paroi : U_p

Le coefficient de transmission U_p traduit la quantité de chaleur s'échappant au travers d'une paroi, incluant des ponts thermiques intégrés, de 1m^2 pour un différentiel de 1 degré. Il s'exprime en $\text{W}/(\text{m}^2.\text{K})$.

Le coefficient de transmission thermique d'une paroi U_p se calcule en additionnant le coefficient de transmission thermique de la paroi homogène U_c et les fuites thermiques dues aux ponts thermiques intégrés (ponctuels χ ou linéique ψ) rapportés à l'aire de la paroi.

Les ponts thermiques :

Les ponts thermiques sont des points de jonction où l'isolation n'est pas continue et qui provoquent des pertes de chaleur. Bête noire du poseur de l'isolant, les ponts thermiques pèsent d'autant plus dans le pourcentage de déperditions de la maison que celle-ci est bien isolée.

Les ponts thermiques intégrés rassemblent les ponts thermiques créés dans la paroi par des éléments tels que les ossatures métalliques, appuis et autres accessoires.

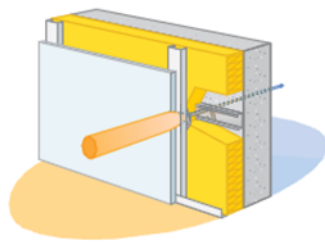
Ils ne doivent pas être confondus avec les ponts thermiques des liaisons qui caractérisent eux les interfaces de parois.

Les ponts thermiques peuvent être :

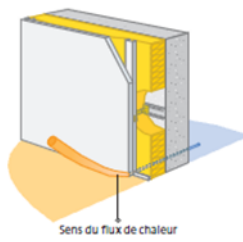
- Ponctuels (noté χ) (exemple : appui métallique dans un doublage sur ossature) ;
- Linéique (noté ψ) (exemple : fourrure métallique dans un doublage sur ossature).
-

Il s'expriment en $\text{W}/(\text{m}.\text{K})$.

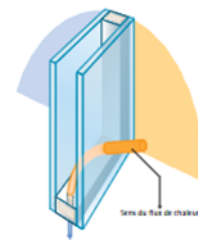
Ponts thermiques intégrés



Appui métallique

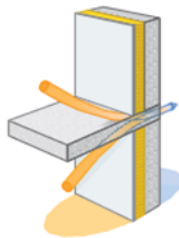


Rail métallique

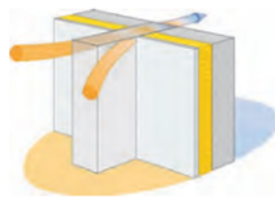


Espaceur de vitrage

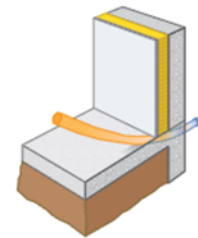
Pont thermiques des liaisons



Plancher intermédiaire



Mur de refend



Plancher bas

L'air humide

L'air humide est un mélange d'air sec et de vapeur d'eau et l'humidité est la masse d'eau contenue dans une masse d'air ou de gaz.

Cette définition n'est pas accessible à la plupart des appareils de mesure et il a fallu faire appel à d'autres notions telles que la température humide, l'humidité relative ou le point de rosée.

Soit un volume d'air humide, à une température T et une pression P_t . La masse M d'air humide contenue dans ce volume est la somme d'une masse M_a d'air sec et M_v de vapeur d'eau.

$$M_t = M_a + M_v$$

La pression totale P_t est la somme des pressions partielles P_a de l'air et P_v de la vapeur d'eau.

$$P_t = P_a + P_v$$

La vapeur d'eau est un gaz et il faut savoir qu'une goutte d'eau transformée en vapeur occupe à 100 °C un volume 1700 fois plus grand qu'à l'état liquide.

Humidité absolue W

L'humidité absolue W est le rapport de la masse de vapeur d'eau M_v à la masse d'air sec M_a présente dans un même volume :

$$W = M_v / M_a \quad [\text{kg} / \text{kg air sec}]$$

Ce rapport est difficile à mesurer car il faut utiliser un système de dessiccation pour séparer l'air sec de la vapeur. En pratique, on ne mesure jamais l'humidité absolue directement.

Les appareils de mesure donnent en général l'humidité relative ou le point de rosée.

Humidité relative HR

Pour l'air humide non saturé, la capacité d'adsorption de vapeur d'eau dépend du rapport entre la masse M_v de vapeur d'eau contenue dans un volume V et la masse M_{vs} qu'il y aurait à l'état saturé.

L'humidité relative (ou degré hygrométrique) est le rapport entre la pression partielle de vapeur d'eau P_v et la pression de vapeur saturante P_{vs} pour une température et un volume d'air donné :

$$HR = \frac{M_v}{M_{vs}} = \frac{P_v}{P_{vs}} = \frac{W}{W_s}$$

La pression de vapeur d'eau saturante P_{vs} désigne la valeur maximum que peut atteindre la pression partielle P_v de la vapeur, en état d'équilibre avec l'eau liquide à une température T ; au-delà, il y a condensation.

L'humidité relative s'emploie le plus souvent à la pression atmosphérique, mais il faut préciser la température. En effet, la quantité d'eau maximale accessible et P_{vs} augmentent avec la température donc HR augmente quand T diminue et inversement alors que l'humidité absolue reste constante.

Température de rosée

La température de rosée, appelée aussi point de rosée, est la température à laquelle il faut refroidir l'air humide pour atteindre la saturation et donc obtenir un début de condensation (d'où le nom de rosée). Lorsque cette température de rosée T_r est atteinte, la pression partielle de la vapeur est égale à la pression de saturation ($P_v = P_{vs}$), et on a un taux d'humidité relative de 100 %.

Humidité absolue dans les locaux d'habitation

La quantité de vapeur d'eau W_i en g/m³ contenue dans l'air d'un logement est essentiellement liée à trois paramètres qui sont :

- 1 - l'apport et la production de vapeur d'eau,
- 2 - le renouvellement d'air,
- 3 - la température ambiante

L'air humide et les matériaux

Parmi les matériaux du bâtiment, un grand nombre présente un caractère hygroscopique, c'est à dire qu'ils sont capables d'absorber une quantité d'eau plus ou moins importante quand l'humidité relative de l'air ambiant augmente. Le caractère hygroscopique d'un matériau dépend essentiellement du volume de cavités, dont la taille caractéristique est inférieure à $0,1 \mu\text{m}$, contenu dans le matériau. La fixation de la vapeur d'eau dans un milieu poreux est complexe car elle met en jeu deux phénomènes fondamentaux qui apparaissent soit successivement, soit simultanément :

- l'adsorption (mono-moléculaire et pluri-moléculaire).
- la condensation capillaire.

Les quantités d'eau fixées par adsorption surfacique (3 à 4 couches de molécules d'eau) sont généralement très faibles et seul le phénomène de condensation capillaire explique les quantités d'eau importantes qui sont adsorbées par certains matériaux, en particulier ceux à base de ciment, bois ou argile.

Condensation

La condensation est le nom donné au phénomène physique de changement d'état de la matière qui passe d'un état dilué (gaz) à un état condensé (solide ou liquide). On peut expérimenter ce changement d'état en passant lors d'une douche où, au contact du miroir froid, l'humidité de l'air se transforme en gouttelettes.

La plupart des matériaux de construction, et notamment le bois, sont perméables à la vapeur d'eau. D'autre part, la présence de sources de vapeur d'eau à l'intérieur a pour résultat qu'en général, la pression de vapeur d'eau (ou l'humidité absolue) est plus grande à l'intérieur qu'à l'extérieur. La vapeur d'eau tend donc à sortir du bâtiment pour rétablir l'équilibre. Les passages possibles sont

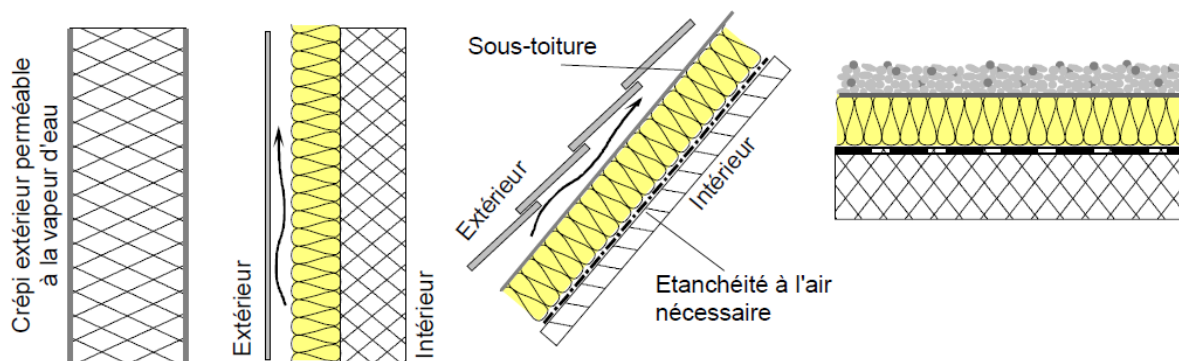
- La convection au travers des fissures ou autres ouvertures
- La diffusion au travers des matériaux poreux.

Pendant la saison froide, la vapeur allant vers l'extérieur se trouve dans un environnement de plus en plus froid et l'air environnant peut se trouver à une température égale ou inférieure à son point de rosée: la vapeur d'eau en excès condense soit en brouillard en suspension dans l'air, soit en gouttelettes sur les surfaces proches.

Cette eau de condensation peut entraîner des dégâts (taches, moisissures, gel). Il est donc important que la structure de l'enveloppe du bâtiment soit conçue de manière à éviter un excès d'eau de condensation.

Pour éviter le transport de vapeur d'eau par convection, il est essentiel que l'enveloppe soit étanche, et que la couche d'étanchéité se trouve dans une zone suffisamment chaude pour que la vapeur d'eau ne condense pas sur cette couche. Cette "barrière à air" est essentielle

dans les constructions en bois, où le travail du bois peut facilement créer des fissures entre les éléments de construction.



Pour éviter que la diffusion de vapeur au travers des matériaux poreux entraîne une quantité d'eau condensée inacceptable, il on peut utiliser les trois méthodes suivantes, seules ou en combinaison:

1. Maintenir une température élevée dans tout l'élément de construction, donc poser l'isolation à l'extérieur.
2. Faciliter la diffusion de la vapeur d'eau à l'extérieur de la couche d'isolation thermique.
3. Limiter la diffusion de la vapeur d'eau à l'intérieur de la couche d'isolation thermique.

La procédure de calcul simplifiée, dite "de Glaser", décrite dans la norme EN ISO 13788 permet d'évaluer le transport d'humidité par diffusion et donc le risque de condensation exagérée. La Figure 8.3 montre des structures ne présentant aucun risque de condensation interstitielle.

2. THERMIQUE DE LA PAROI

2.1. Évaluer l'isolation thermique des murs

L'isolation du mur dépend de la nature, de l'épaisseur et de l'état des différentes couches le composant.

Comment évaluer la situation ?

⇒ **Connaître les valeurs de référence**

Une paroi est caractérisée par un coefficient de transmission thermique U . Plus ce coefficient est petit plus la paroi est isolante. La réglementation thermique wallonne impose, pour les parois neuves et assimilées délimitant le volume protégé, une valeur maximale du coefficient de transmission thermique. Ces valeurs peuvent être vues comme un « garde-fou ». D'autres labels volontaires recommandent d'ailleurs des performances thermiques plus élevées.

Ces valeurs à respecter au minimum dans un nouveau bâtiment peuvent néanmoins servir de base pour évaluer la qualité d'un bâtiment existant.

Cependant, une amélioration de l'isolation seule (sans réfection souhaitée de la paroi (finition,...)) n'est généralement pas rentable si :

- $U \leq 0.8$ W/m²K pour les murs extérieurs,
- $U \leq 0.9$ W/m²K pour les murs entre le volume protégé et un espace à l'abri du gel,
- $R \geq 0.7$ m²K/W pour les murs en contact avec le sol.

2.2. Évaluer l'isolation thermique des planchers

L'isolation thermique du plancher inférieur dépend non seulement de la nature, de l'épaisseur et de l'état de l'isolant, mais aussi, lorsque le plancher ne se trouve pas au-dessus de l'environnement extérieur, des caractéristiques du sol, de la cave ou du vide sanitaire.

Comment évaluer la situation ?

⇒ **Connaître les valeurs de référence**

Une paroi est caractérisée par un coefficient de transmission thermique U . Plus ce coefficient est petit plus la paroi est isolante. La réglementation thermique wallonne impose, pour les parois neuves et assimilées délimitant le volume protégé, une valeur maximale du coefficient de transmission thermique. Ces valeurs peuvent être vues comme un « garde-fou ». D'autres labels volontaires recommandent d'ailleurs des performances thermiques plus élevées.

Ces valeurs à respecter au minimum dans un nouveau bâtiment peuvent néanmoins servir de base pour évaluer la qualité d'un bâtiment existant.

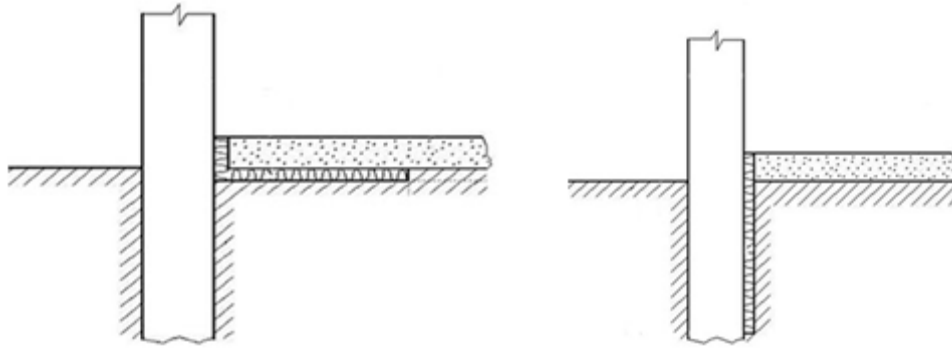
Plancher accessible par le bas

On peut considérer que l'isolation d'un plancher existant accessible par le bas (l'isolation peut être posée sous celui-ci) est suffisante si $R \geq 1$ W/m²K. En effet, en dessous de cette valeur, le temps de retour sur investissement devient assez important. Néanmoins, une rénovation complète ou partielle (finitions, revêtements,...) sera toujours une bonne occasion de renforcer l'isolation.

Plancher sur sol

Si le plancher est posé sur le sol et que le rapport entre le périmètre exposé et sa surface (P/A) est inférieur à 0.30, l'amélioration de l'isolation n'est généralement pas nécessaire du fait que, la configuration même du plancher limite déjà les pertes thermiques.

Dans certains cas, l'amélioration de l'isolation d'une dalle posée sur sol peut être très coûteuse (démolition des sols existants) et un calcul de rentabilité spécifique au bâtiment est indispensable avant toute prise de décision. Le coût des travaux peut cependant être limité en n'isolant que la périphérie du plancher, soit horizontalement, soit verticalement.



Isolation périphérique horizontale.

Isolation périphérique verticale.

On obtient une valeur acceptable de $R \geq 1 \text{ m}^2\text{K/W}$ dont il est question ci-dessus, avec des épaisseurs :

- de 4 cm de mousse de polystyrène extrudé ($\lambda = 0.040 \text{ W/mK}$ suivant Annexe VII de l'AGW du 17 avril 2008)
- de 5 (4.5) cm de mousse de polystyrène expansé ($\lambda = 0.045 \text{ W/mK}$)
- de 5 (4.5) cm de mousse de laine minérale ($\lambda = 0.045 \text{ W/mK}$)
- de 4 (3.5) cm de mousse de polyuréthane ($\lambda = 0.035 \text{ W/mK}$)
- de 6 (5.5) cm de verre cellulaire ($\lambda = 0.055 \text{ W/mK}$)

Calcul plus précis

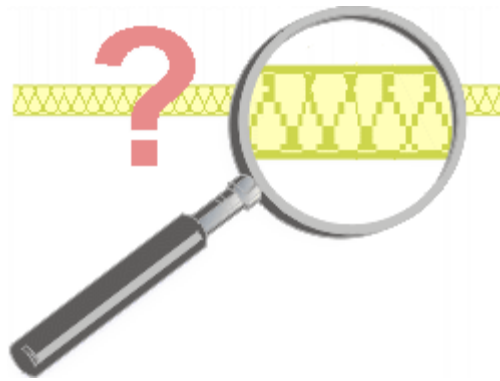
Si les matériaux constituant le plancher sont connus, il est possible de calculer exactement le coefficient de transmission thermique U ou la résistance thermique R exacte de celui-ci.

Il faudra cependant distinguer 5 cas.

1. Les planchers situés au-dessus de l'ambiance extérieure
2. Les planchers situés au-dessus d'un espace adjacent non chauffé (EANC)
3. Les planchers posés directement sur le sol
4. Les planchers situés au-dessus d'une cave
5. Les planchers situés au-dessus d'un vide sanitaire

Pour les autres types de plancher, le U se calcule de la manière similaire. Un facteur de correction de température (≤ 1) est cependant appliqué à U_{eq} pour tenir compte de la protection complémentaire amenée par l'EANC espace adjacent non chauffé, le sol, une cave ou un vide sanitaire. Ce facteur de correction peut toujours être considéré comme égal à 1, si on ne veut pas faire l'effort de le calculer. Ce choix peut être très pénalisant surtout dans les cas thermiquement bien protégé. Le calcul précis nécessite l'analyse thermique détaillée.

2.3. Évaluer l'isolation thermique de la toiture



L'isolation d'une toiture dépend de la nature et de l'épaisseur de l'isolant en place, ainsi que de son état.

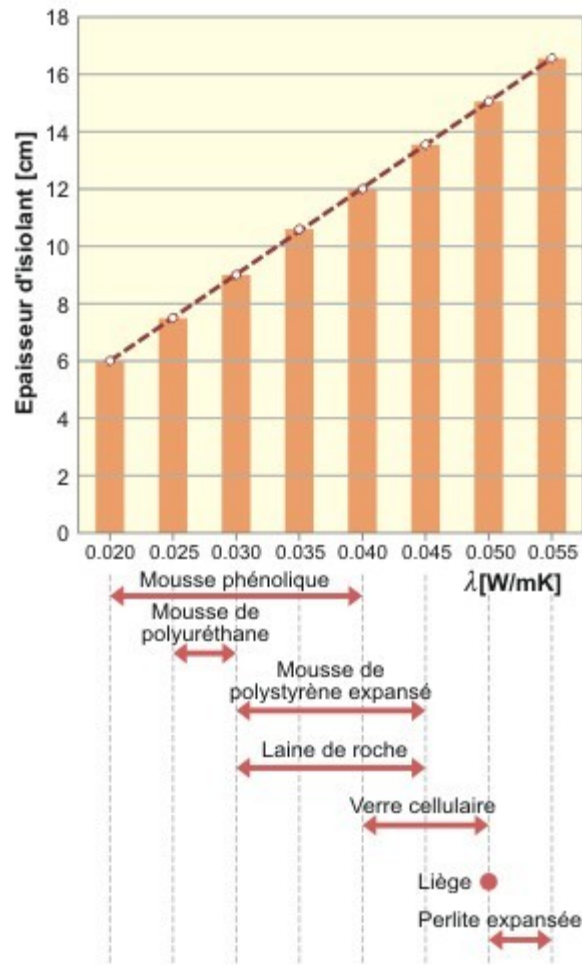
Comment évaluer la situation ?

⇒ Connaître les valeurs de référence

Une paroi est caractérisée par un coefficient de transmission thermique U . Plus ce coefficient est petit plus la paroi est isolante. La réglementation thermique wallonne impose, pour les parois neuves et assimilées délimitant le volume protégé, une valeur maximale du coefficient de transmission thermique. Ces valeurs peuvent être vues comme un « garde-fou ». D'autres labels volontaires recommandent d'ailleurs des performances thermiques plus élevées.

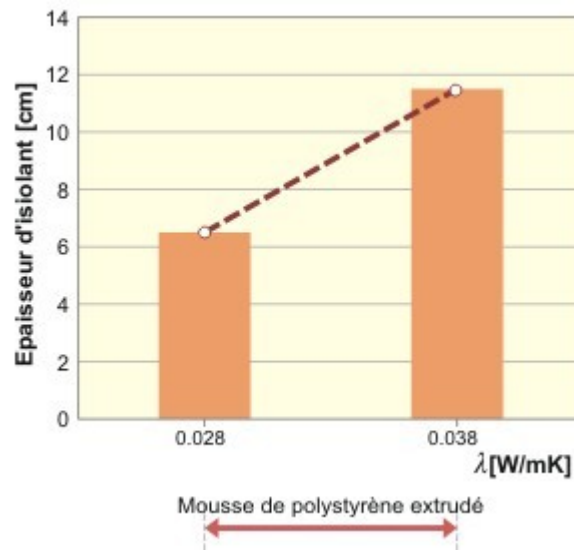
Même lorsque cette réglementation n'est pas d'application, cette valeur peut servir de base pour estimer la valeur minimale qu'il serait intéressant d'atteindre en cas de rénovation de la toiture. Généralement, l'optimum économique en rénovation se situe à un coefficient $U = 0,3 \text{ W/m}^2\text{K}$.

Pour les toitures plates autres que la toiture plate inversée, l'épaisseur d'isolant à poser en fonction du coefficient de conductivité thermique de celui-ci est donnée sur le graphique ci-dessous. Pour chaque isolant, il existe un intervalle de valeurs possibles pour la conductivité thermique. Le diagramme ci-dessous permet de déterminer dans quel intervalle d'épaisseur il faudra se situer en fonction du type d'isolant choisi.



Estimation de l'épaisseur d'isolant nécessaire pour atteindre un $U = 0.3 \text{ W/m}^2\text{K}$ dans le cas d'une toiture plate autre qu'une toiture plate inversée en fonction de la conductivité thermique (λ) ou du type d'isolant choisi (les intervalles de valeurs pour chaque isolant correspondent aux valeurs certifiées).

Pour une toiture inversée, l'isolant généralement retenu est la mousse de polystyrène extrudé (il est à éviter en cas de toiture chaude à cause de son coefficient de dilatation élevé). L'épaisseur d'isolant à poser en fonction de la conductivité thermique est donnée dans le graphique suivant.



Estimation de l'épaisseur d'isolant nécessaire pour atteindre un $U = 0.3 \text{ W/m}^2\text{K}$ dans le cas d'une toiture plate inversée de référence en fonction de la conductivité thermique (λ) ou du type de l'isolant choisi (marques et types - valeurs certifiées).

Si la toiture existante est en bon état, on considère généralement que la limite pour décider d'une rénovation est :

$$U > 0,6 \text{ W/m}^2\text{K}$$

En effet, en dessous de cette valeur, le temps de retour sur investissement devient assez important. Une rénovation complète ou partielle (finitions, revêtements extérieurs,...) sera toujours une bonne occasion de renforcer l'isolation.

Pour une toiture autre qu'une toiture plate inversée, elle correspond à une épaisseur approximative d'isolant de :

- 9 cm de laine minérale,
- ou 7 cm de mousse de polyuréthane,
- ou 11 cm de verre cellulaire.

Pour une toiture inversée, elle correspond à une épaisseur d'isolant d'environ :

- 12 cm de mousse de polystyrène extrudé.

Le niveau d'isolation thermique globale du bâtiment : "le niveau K"

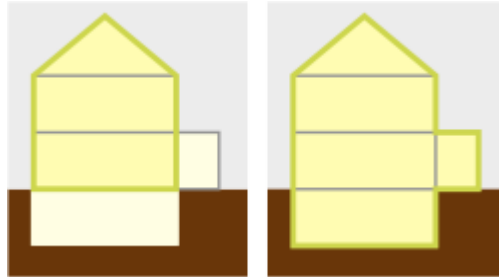
La méthode de calcul

Voici en résumé les principes de ce calcul. Pour obtenir tous les détails réglementaires de la méthode, on consultera utilement l'annexe VII de la réglementation relative à la P.E.B

Étape 1 : délimiter le volume protégé V

Le volume protégé V d'une construction est constitué par l'ensemble des locaux chauffés (directement ou non).

Délimiter le volume protégé revient à séparer ces locaux d'autres locaux non chauffés. En général, c'est la couche isolante qui détermine ce volume. Un grenier qui sert de chambre fait donc partie du volume protégé, même s'il n'y a pas de radiateur installé.

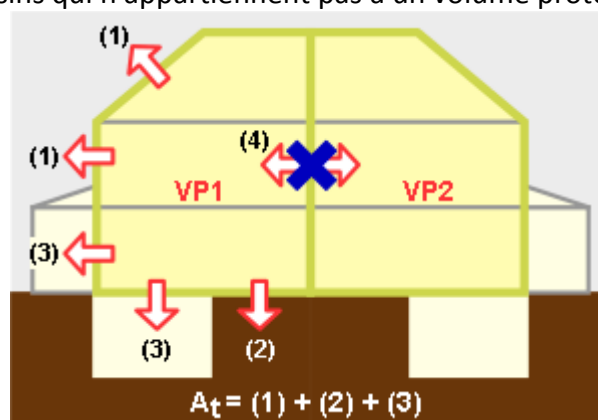


Dans le premier cas, la cave et le garage ne sont pas chauffés; dans le deuxième cas, il s'agit de deux locaux utilisés et chauffés. En toute logique, on souhaite que ce soit l'ensemble de la frontière de ce volume chauffé qui réponde à un minimum de qualité thermique.

Étape 2 : repérer la superficie de déperdition thermique A_t

La superficie de déperdition A_t est la somme de toutes les superficies de toutes les parois qui séparent le volume protégé :

- de l'ambiance extérieure (1),
- du sol (2),
- des espaces voisins qui n'appartiennent pas à un volume protégé (3).



Remarque : les parois mitoyennes ne sont donc pas comptabilisées (puisque le delta de température est considéré comme nul ou négligeable).

Étape 3 : calculer le coefficient de transfert thermique par transmission du bâtiment H_t

$$H_T = H_D + H_g + H_U \quad [W/K]$$

où :

- H_D = coefficient de transfert thermique par transmission à travers les parois directement en contact avec l'extérieur [W/K] ;
- H_g = coefficient de transfert thermique par transmission à travers les parois en contact avec le sol [W/K];
- H_U = coefficient de transfert thermique par transmission à travers les parois en contact avec des espaces non-chauffés [W/K];

Chacun de ces coefficients est calculé, pour chaque paroi, de manière générique par la formule suivante :

$$H = \alpha \cdot \sum_{i=1}^n U_i A_i + \sum_{k=1}^m l_k \psi_k + \sum_{l=1}^r \chi_l$$

où :

- α : coefficient de pondération tenant compte de l'environnement de la paroi [$0 < \alpha < 1$ (environnement extérieur)]

La valeur de ce coefficient de pondération "α" a pour but de diminuer les déperditions des parois qui ne sont pas directement en contact avec la température extérieure. Ainsi, en toute logique, on considérera des déperditions différentes selon qu'un même mur soit en contact avec le sol, un espace non chauffé ou l'environnement extérieur.

- A_i : surface de l'élément de construction i de l'enveloppe du bâtiment, déterminée avec les dimensions extérieures [m^2];
- U_i : valeur U de l'élément de construction i de l'enveloppe du bâtiment, déterminée avec les dimensions extérieures [W/m^2K];
- l_k : longueur du pont thermique linéaire k présent déterminée avec les dimensions extérieures [m];
- Ψ_k : coefficient de transmission thermique linéique du pont thermique linéaire k [W/mK];
- χ_l : coefficient de transmission thermique ponctuel du pont thermique ponctuel l [W/K].

Étape 4 : déterminer le coefficient de transfert de chaleur moyen du bâtiment "Um"

$$U_m = H_t / A_t \text{ [W/m}^2\text{K]}$$

Le coefficient U_m est donc obtenu par le rapport entre le coefficient de transfert thermique total (H_t) et la surface de déperditions du volume protégé (A_t). Cette valeur nous donne une idée de la déperdition énergétique moyenne par m^2 de surface déperditive.

Étape 5 : déterminer la compacité volumique du bâtiment V/At

La compacité volumique est le rapport entre le volume protégé V et la superficie de déperditions A_t du bâtiment.

$$C = V / A_t \text{ [m]}$$

Plus grande est la compacité, plus petite est la perte d'énergie par m^3 chauffé. La réglementation sera dès lors moins sévère pour des bâtiments avec grande compacité (ex : bloc d'appartements).

A noter que l'on peut en déduire une réflexion sur le plan de la composition architecturale : l'habitation "4 façades" entourée d'un jardin n'est pas une bonne solution sur le plan environnemental (déperditions par m^2 élevées...).

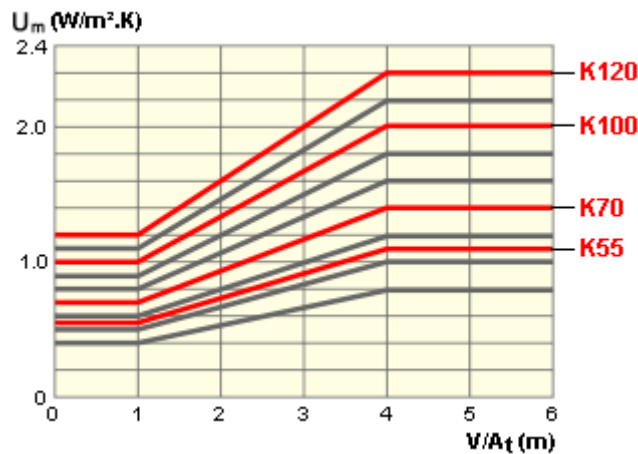
Étape 6 : déterminer le niveau K du bâtiment

La réglementation définit conventionnellement le niveau K par la relation :

$$K = 100 U_m / U_{m,\text{réf}}$$

Compacité	$U_{m,réf}$
$V/A_t < 1 \text{ m}$	$U_{m,réf} = 1$
$1 \text{ m} < V/A_t < 4 \text{ m}$	$U_{m,réf} = (C+2) / 3$
$4 \text{ m} < V/A_t$	$U_{m,réf} = 2$

Le niveau K est donc directement fonction de la compacité volumique V/A_t et du coefficient moyen de transmission thermique U_m .



Si le U_{moyen} de l'enveloppe ($= U_m$) est de 0,6 et que la compacité est de 0,9 m, le niveau "K" du bâtiment est "K60".

Mais un même U_{moyen} pour un bâtiment de compacité volumique 5 (immeuble d'appartements) entraîne une valeur "K30".

Et si la compacité volumique est de 2, $K = (300 \times 0,6) / (2 + 2) = 45$, soit un bâtiment déclaré "K45".

3. ISOLATION THERMIQUE

L'isolation thermique du bâtiment améliore le confort, réduit les dépenses en énergie, diminue la production de CO2 et donc la pollution de l'air.

A l'inverse, un défaut d'isolation peut engendrer des plaintes très diverses : une sensation de froid, une sensation de chaud, des problèmes d'humidité...

Lorsque l'installation de chauffage n'est pas en cause, une sensation de froid peut par exemple provenir d'une température de surface des parois trop basse. Cette impression est due au rayonnement thermique des occupants vers les parois froides non ou mal isolées.

De plus, une température de surface intérieure froide peut entraîner une **condensation de surface** récurrente et être à l'origine de la prolifération de champignons sur certains revêtements intérieurs.

Une sensation de chaud peut également provenir, en été, d'un manque d'isolation de la façade.

Dans tous ces cas, on vérifiera le niveau d'isolation des parois.

Idéalement, toute paroi qui délimite le volume chauffé devrait être isolée. L'isolation des toitures mérite souvent une intervention prioritaire.

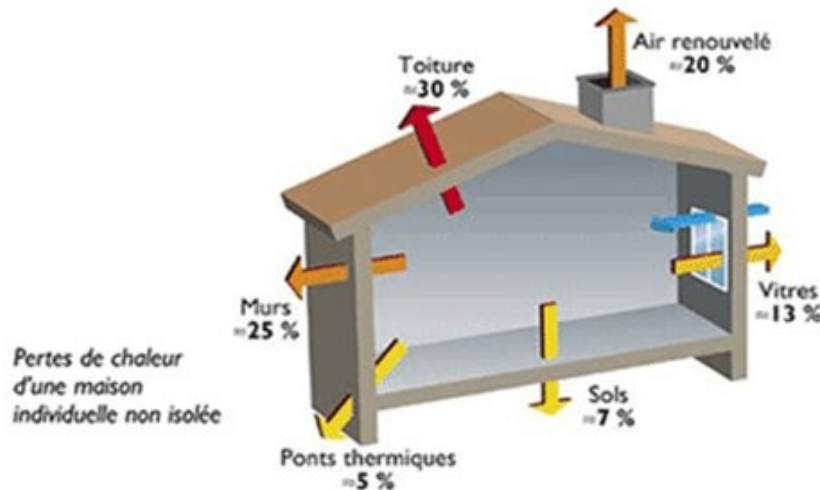
En effet :

- La température de l'air au plafond est plus élevée qu'au sol (l'air chaud monte). Or, la quantité de chaleur qui traverse une paroi est d'autant plus importante que la différence entre les températures de chaque côté de cette paroi est grande.
- L'isolation des toitures est parfois facile à réaliser. Elle est donc plus facilement rentable.

Isoler une paroi nécessite cependant des précautions particulières pour éviter des désordres graves (étanchéité, condensations internes, etc.).

En effet, une maison non isolée laisse s'échapper la chaleur par :

- ⇒ la toiture (environ 30 %)
- ⇒ les murs (20 à 25 %)
- ⇒ le renouvellement de l'air (20 %)
- ⇒ les vitrages (13 à 15 %)
- ⇒ les planchers (7 à 10%)
- ⇒ les ponts thermiques (environ 5 %)



En diminuant les pertes de chaleur par les parois, une isolation thermique efficace peut réduire les besoins en énergie de plus de 60 %.

AMELIORER LE CONFORT DU RESIDENT

L'hiver, dans une maison non isolée, nous ressentons des sensations d'inconfort dues à la froideur des parois (murs et fenêtres), provoquée par le contact de celles-ci avec l'air extérieur. L'été, à l'inverse, les parois d'une maison non isolée seront chaudes. La solution idéale : isoler l'habitation par l'extérieur afin de bénéficier de l'inertie thermique des murs. L'inertie thermique des matériaux utilisés dans une maison est synonyme de confort.

L'inertie thermique c'est quoi?

Pour faire simple, c'est la capacité du bâtiment à stocker de la chaleur dans ses murs, ses planchers, etc.... Plus l'inertie du bâtiment est forte, plus il se réchauffe et se refroidit

lentement. Ce laps de temps est le déphasage. Plus les murs sont épais et les matériaux qui les constituent sont lourds, plus l'inertie est importante et donc le temps de déphasage important. C'est pourquoi il faut privilégier l'isolation côté extérieur qui protège extérieurement l'habitation et permet intérieurement à l'inertie thermique des murs de jouer son rôle.

3.1. Les isolants et pare-vapeur

1. Les types d'isolants : généralités
2. Les isolants synthétiques
3. Les isolants minéraux
4. Les isolants "écologiques"
5. Les pare-vapeur

1. Les types d'isolants : généralités

Un matériau est généralement considéré comme "isolant" lorsque son coefficient de conductivité thermique à l'état sec est inférieur ou égal à 0.07 W/mK.

Les grandes catégories d'isolants

➤ Les isolants synthétiques

On regroupe sous ce nom les isolants tels que les mousses de **polyuréthane** et de **polystyrène**. Ces matériaux sont très défavorables. Issus de la chimie du chlore et du pétrole, ils sont produits à partir de matières non renouvelables et selon des procédés énergivores.

Ces isolants contiennent des substances qui appauvrissent la couche d'ozone (comme les HCFC) et libèrent des gaz toxiques et mortels en cas d'incendie. Des substituts aux CFC commencent à être utilisés et on a recours lors de la fabrication à de plus en plus de matériaux recyclés.

Dans cette catégorie, la mousse **phénolique** semble faire exception. Ces très bonnes caractéristiques thermiques associées à son caractère renouvelable, au faible rejet de polluant au long de sa durée de vie la rendent plus intéressante que les autres isolants synthétiques. Mais ce matériau récent ne possède pas encore réellement de filière de distribution et le retour pratique sur son utilisation et sa mise en œuvre est encore réduite.

➤ Les laines minérales

Ces isolants sont issus de matériaux abondants (roches volcaniques et sable) et présents en Europe. Ils sont souvent composés de matériaux recyclés. Tant que la teneur en liant reste inférieure à 5%, leur élimination se fait par mise en décharge comme matériaux inertes ou par recyclage complet (laine de roche). Leur procédé de fabrication est toutefois également très énergivore.

➤ Les isolants "écologiques"

Ces isolants combinent généralement un matériau issu de sources renouvelables (végétaux, cellulose recyclée), et un mode de production peu énergivore.

Remarquons que la matière première est parfois peu abondante, ou disponible uniquement dans certaines régions (ex. liège).

En général, l'élimination des isolants "écologiques" peut se faire sans danger par compostage. Mais cela dépend du mode de fabrication. Par exemple, les isolants à base de chanvre ou de lin contiennent souvent du polyester.

Les formes d'isolant

Selon leur nature, les matériaux isolants présentent différentes formes, raideurs et résistances à la compression :

Formes	Matériaux
Matelas semi-rigide ou souple :	La laine de roche, la laine de verre, les fibres traitées organiques (chanvre, ...) ou animales (laine, ...) ...
Panneaux rigides :	La mousse de polyuréthane, de polystyrène expansé ou extrudé, le verre cellulaire, les panneaux organiques (fibre de bois avec liant bitumineux ou caoutchouc, ...), le liège ...
Les flocons ou granulés :	Les granulés de perlite ou de vermiculite, les granulés de polystyrène expansé, les granulés de liège, les flocons de laine minérale insufflés, les flocons de papier recyclé ...

Les matériaux composites

Il existe des matériaux composites qui sont constitués de plaques juxtaposées de matériaux différents, isolants ou non.

Ces panneaux combinent les propriétés des matériaux qui les composent : résistance à la compression, imperméabilité à la vapeur, qualités thermiques, comportement au feu, comportement à l'humidité, aspect fini, etc.

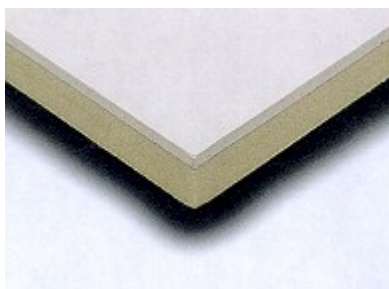
Exemples :



Panneaux sandwichs autoportants avec ou sans armature de renforcement.



Panneaux de mousse PUR avec lestage ou surface circulaire en béton.



Panneau complexe.

Quel isolant pour quel usage ?

Le tableau suivant présente une partie des choix envisageables pour isoler un bâtiment. Cette liste n'est bien entendu pas exhaustive. La colonne "choix traditionnel" montre ce qui est traditionnellement réalisé. Les deux autres colonnes, montre vers quelles solutions il faut se tourner lorsque l'on veut se rapprocher d'une démarche d'éco-construction.

	Choix traditionnel	Choix plus écologique	Choix plus écologique
		+	++
Dalle de sol	Polyuréthane Polystyrène	Laine de roche haute densité	Verre cellulaire. Argile expansé.
Double mur extérieur	Polyuréthane Polystyrène Laine minérale		Laine végétale et animale. Chaux-chanvre (ossature bois). Flocons de cellulose (ossature bois).
Toiture à versants	Laine minérale		Laine végétale et animale. Chaux-chanvre (ossature bois). Flocons de cellulose (ossature bois).
Toiture plate	Polyuréthane Polystyrène	Laine minérale	Verre cellulaire. Argile expansée. Flocons de cellulose (ossature bois).

2. Les isolants synthétiques

➤ **La mousse de polyuréthane (PUR)**



Il s'agit de panneaux à base de mousse expansée de polyuréthane.

Le polyuréthane se caractérise par un pouvoir isolant élevé. Il résiste cependant mal à la chaleur, au feu et au rayonnement ultra-violet.

Les panneaux de polyuréthane destinés aux toitures plates auront une densité volumique (ρ) au moins égale à 30 kg/m^3 . Ces panneaux sont surfacés d'un revêtement synthétique ou d'un voile de verre bitumé sur les deux faces, destinés à faciliter les liaisons avec les couches inférieures et supérieures.

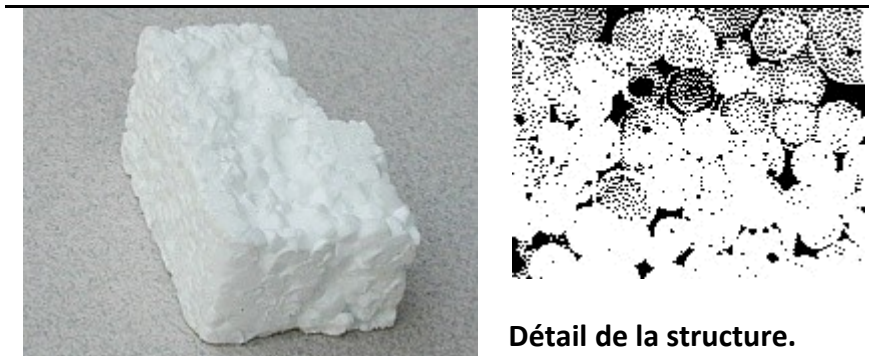
➤ **La mousse de polyisocyanurate (PIR)**

Il s'agit de panneaux à base de mousse expansée de polyisocyanurate.

Le polyisocyanurate se caractérise par un meilleur comportement au feu que le polyuréthane mais ses propriétés mécaniques sont plus faibles.

Les panneaux de polyisocyanurate destinés aux toitures plates sont surfacés d'un revêtement synthétique ou d'un voile de verre bitumé sur les deux faces, destinés à faciliter les liaisons avec les couches inférieures et supérieures.

➤ **La mousse de polystyrène expansé (EPS et EPS-SE)**

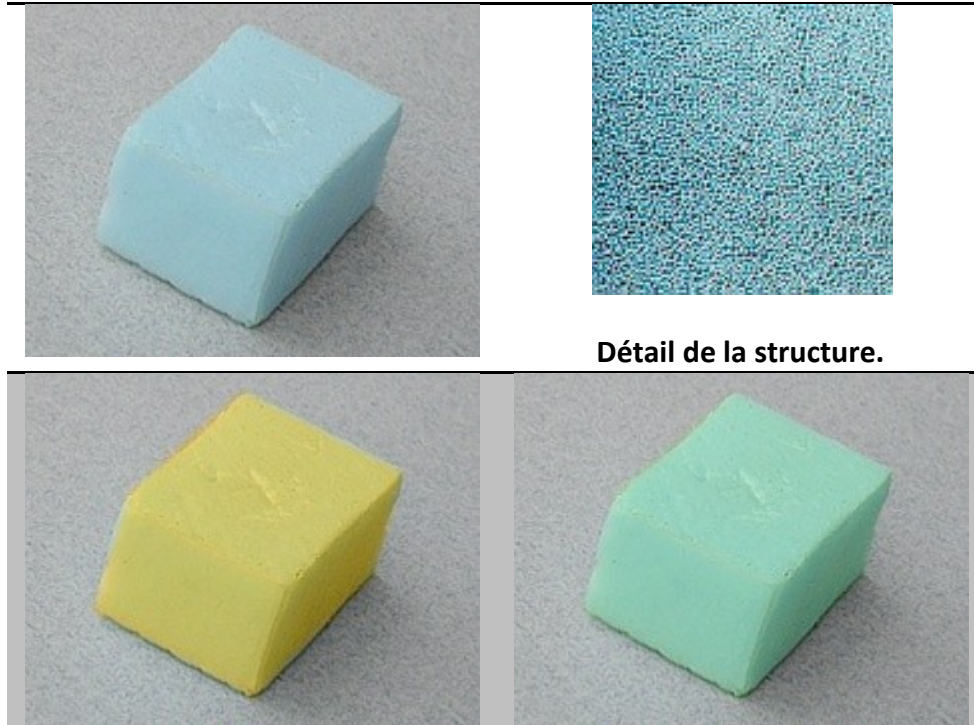


Il s'agit de panneaux à base de mousse expansée de polystyrène.

Le polystyrène expansé se caractérise par un retrait de naissance important. Il ne peut être exposé longtemps à une température supérieure à 70°C . Il résiste mal au feu. Il existe cependant des panneaux dont le comportement au feu est meilleur (qualité SE).

Les panneaux en polystyrène expansé destinés aux toitures plates sont recouverts sur les deux faces d'un voile de verre bitumé avec recouvrement au droit des joints.

➤ **La mousse de polystyrène extrudé (XPS)**



Il s'agit de panneaux à base de mousse extrudée de polystyrène.

Le polystyrène extrudé se caractérise par une structure cellulaire fermée et une surface d'extrusion qui empêchent l'absorption d'humidité. Son coefficient de dilatation thermique est très élevé. Il résiste mal au feu et à une exposition prolongée à une température supérieure à 75°C.

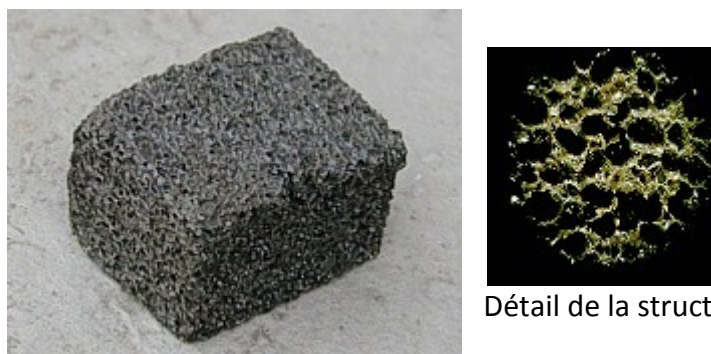
➤ **La mousse phénolique (PF)**

Il s'agit de panneaux à base de mousse résolique à structure cellulaire fermée.

La mousse phénolique se caractérise par un bon comportement au feu et un pouvoir isolant très élevé.

3. Les isolants minéraux

➤ **Le verre cellulaire (CG)**



Le verre cellulaire est une mousse de verre obtenue par expansion de celui-ci lorsqu'il est en fusion. Les cellules ainsi formées contiennent un gaz inerte.

Son procédé de fabrication conduit à la production d'un isolant léger à cellules fermées. Le verre cellulaire est ainsi complètement étanche à la vapeur d'eau, à l'eau et à l'air. Il se caractérise par une bonne stabilité thermique et un bon comportement au feu. Bien qu'incompressible, ce matériau est relativement fragile et nécessite un support régulier et rigide lorsqu'il est soumis à des contraintes mécaniques.

Disponible en panneaux ou en gros granulés, son seul défaut, en plus de son coût élevé, est d'être produit par des procédés de fabrication très énergivore.

➤ **La perlite expansée (EPB)**



La perlite expansée est obtenue à partir de pierre volcanique rhyolitique concassée et expansée à une température de +/- 900°C.

La perlite expansée est mélangée à des fibres cellulosiques et à un liant bitumineux pour former des panneaux mais peut aussi être utilisée en vrac.

La perlite expansée se caractérise par une grande résistance à la compression et au poinçonnement, un bon comportement au feu et une résistance limitée au pelage. Elle ne résiste pas à une humidification prolongée.

➤ **La vermiculite**



Granule de vermiculite grossi.

La **vermiculite** est produite à partir de mica expansé. Elle est disponible sous forme de granulés ou de panneaux. Comme la perlite, ce matériau peut être déversé en vrac ou être incorporé dans les mortiers, bétons allégés, enduits isolants et dans les blocs de constructions.

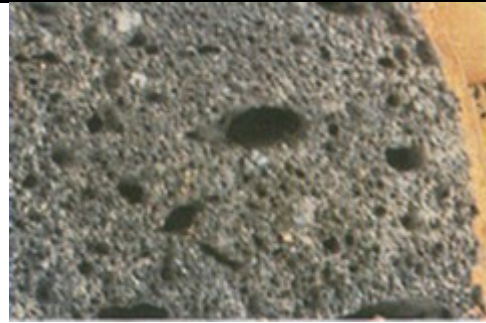
➤ **L'argile expansée**

Elle est vendue en vrac, en panneaux ou incorporée dans des bétons allégés, des blocs de construction préfabriqués.

L'argile expansée présente un excellent classement au feu et offre une bonne résistance à l'humidité.



Granules d'argile expansée



Granule d'argile expansée grossie et coupée

4. Les isolants "écologiques"



Pour s'inscrire dans une démarche d'éco-construction, il est nécessaire de ne pas choisir un isolant uniquement sur base de ses propriétés thermiques, techniques et économiques.

Les types d'isolants écologiques classiques



➤ **Isolants à base de cellulose**

Isolants à base de papier recyclé, leur conductivité est comparable à celle des laines minérales. Ce matériau possède la caractéristique de pouvoir absorber la vapeur d'eau et permet ainsi de réguler l'humidité. Son absorption acoustique est excellente.

Un traitement au sel de bore protège ces isolants des attaques d'insectes, des champignons et du feu.

Les flocons de cellulose sont soufflés sous pression soit dans des caissons fermés soit sur des surfaces horizontales. Certains critères ont été définis afin de garantir le non-tassement ultérieur des flocons dans les caissons.

Ces isolants à base de cellulose existent aussi sous forme de panneaux semi-rigides ou flexibles. Ils sont utilisés pour l'isolation des sols, des toitures, des cloisons légères et des murs à ossature bois.



Panneaux de cellulose



Flocons de cellulose humidifiées et projetés.

➤ Isolant sous forme de laine d'origine végétale ou animale

Il existe de nombreux types de laine végétale ou animale disponibles en vrac, en feutre fin, en rouleaux ou en panneaux semi-rigides. On trouve par exemple des **laines en fibre de coco**, de **lin**, de **chanvre**, de **bois** ou en **mouton**. Certains de ces isolants reçoivent un traitement au sel de bore qui les protège des attaques d'insectes, des champignons et du feu.

Ils possèdent la capacité d'absorber et de restituer l'humidité, remplissant ainsi la fonction de régulateur d'humidité.

De par leur caractère fibreux, ces isolants possèdent aussi de très bonnes caractéristiques acoustiques.

Certains offrent une meilleure résistance à l'humidité, comme ceux à base de fibre de coco, et peuvent donc être utilisés pour calfeutrer les ouvertures (raccords châssis-maçonnerie) ou être placé dans des endroits soumis à une humidité particulièrement élevée.



Laine de lin en vrac



Laine de lin en rouleaux



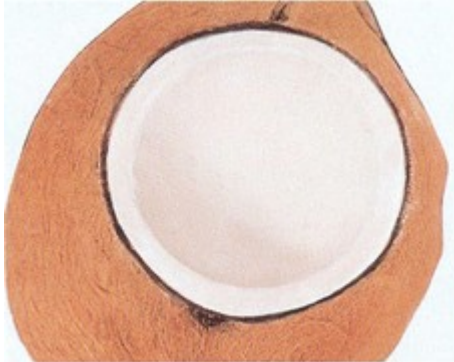
Laine de lin en panneaux



Laine de chanvre en rouleaux



Laine de chanvre en panneaux semi-rigides



Noix de coco sciée



Panneaux et rouleaux de laine de coco

Les panneaux de **fibre de bois** sont fabriqués à partir de déchets de scierie. Les fibres sont agglomérées par leur propre résine (procédé de fabrication humide) ou par de la colle (procédé à sec). Lorsque ce second procédé est utilisé, les panneaux ne sont pas recyclables. Lorsque plusieurs panneaux sont collés ensemble pour obtenir une plus grosse épaisseur d'isolant, de la colle est utilisée. Les panneaux sont perméables à la vapeur, ils complètent très bien les autres isolants.



Panneaux de bois feutré

➤ Isolant à base de minéraux

⇒ Les isolants minéraux (hors laines) sont généralement considérés comme isolants écologiques.

Le liège

Provient de l'écorce du chêne-liège. Les écorces sont réduites en grains qui peuvent être ensuite agglomérés à chaud par la résine du liège. Il existe en vrac ou en panneau. Il peut donc être insufflé dans les planchers existants.

Certains panneaux sont renforcés avec des colles synthétiques et dégagent du formaldéhyde : à éviter !

Cet isolant possède une bonne résistance à l'humidité, est imputrescible et difficilement inflammable.

Le principal problème, en plus de son coût élevé, réside dans sa disponibilité.



Liège

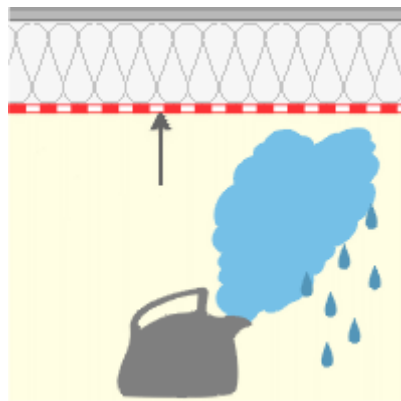
Les matériaux chaux-chanvre

Composé d'un mélange de liant à base de chaux aériennes (CL90-S) et de copeaux de chanvre cet isolant peut servir pour isoler les murs, le toit, les sols, en adaptant simplement les mélanges. Actuellement l'usage le plus fréquent du chaux-chanvre est le remplissage des murs à ossature bois (30 cm) ou d'enduits isolants (10 cm) sur un support existant.

Son coefficient d'isolation est proche de celui du bois massif ($\lambda = \pm 0.1$), mais le matériau possède d'importantes qualités du point de vue de l'inertie thermique et de la régulation de la vapeur d'eau.

De plus, son cycle de vie est souvent pris en exemple : faible énergie grise, stockage de CO₂, recyclable, matière première locale ...

5. Les pare-vapeur



Toutes les matières sont plus ou moins perméables à la vapeur.

Sous l'influence de la différence de pression de vapeur d'eau des deux côtés d'une paroi, la vapeur a tendance à vouloir migrer par diffusion à travers celle-ci.

Pour éviter les phénomènes de condensation interne, il est parfois nécessaire de placer du côté chaud de l'isolant d'une paroi, une couche de matériau relativement étanche à la vapeur d'eau.

Cette couche de matériau est appelée "écran pare-vapeur".

Le pare-vapeur remplit les fonctions suivantes :

- Éviter une condensation excessive.
- Empêcher, dans l'isolant thermique, l'absorption d'eau par capillarité en provenance des éléments de construction contigus.

- Assurer l'étanchéité provisoire à l'eau de pluie lors de la construction.
- Assurer l'étanchéité à l'air.

Définitions :

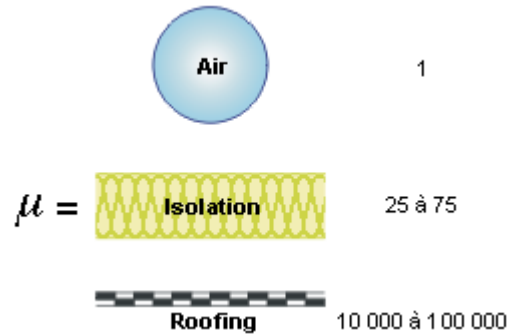
Un pare-vapeur est un matériau qui s'oppose au passage de la vapeur d'eau.

Un frein-vapeur est un matériau qui régule le flux de vapeur d'eau.

Le coefficient de résistance à la diffusion de vapeur (μ)

Le coefficient de résistance à la diffusion de vapeur (μ) d'un matériau indique dans quelle mesure, la vapeur d'eau traverse plus difficilement ce matériau qu'une couche d'air.

La quantité de vapeur d'eau diffuse à travers une couche d'une paroi dépend de la valeur μ du matériau et de l'épaisseur (d) de cette couche.

**Exemple :**

Lorsque le μ d'un matériau vaut 5, cela signifie :

Que l'air traverse 5 fois plus difficilement ce matériau que l'air, ou, en d'autres mots,

Que 20 cm de ce matériau exerce la même résistance à la diffusion de la vapeur que 100 cm d'air stationnaire.

Classe	Résistance à la diffusion de vapeur	Exemples de matériaux utilisables comme pare-vapeur
E1	$2 \text{ m} < \mu d < 5 \text{ m}$	Papier bitumé
		Film en PE 0,2 mm
		Papier de tapisserie plastifié
		Peinture à l'huile
E2	$5 \text{ m} < \mu d < 25 \text{ m}$	Peinture au caoutchouc chloré
		Carton-plâtre recouvert d'une feuille d'aluminium
		Film de PE 0,2 mm et laminé d'aluminium
		Voile de polyester bitumineux P150/16
E3	$25 \text{ m} < \mu d < 200 \text{ m}$	Voile de verre bitumineux V50/16
		Membrane en PVC épaisseur > 1 mm
		Bitume armé P3 ou P4 ou V3 ou V4
		Bitume polymère APP ou SBS
E4	$200 \text{ m} < \mu d$	Film PIB
		Bitumes armés avec film métallique
		Système bitumineux multicouche

3.2. Les techniques d'isolations**3.2.1. Les toitures**

3.2.1.1. la toiture plate

Il existe plusieurs systèmes de conception d'une toiture plate : **la toiture froide, la toiture chaude, la toiture inversée, la toiture combinée.**

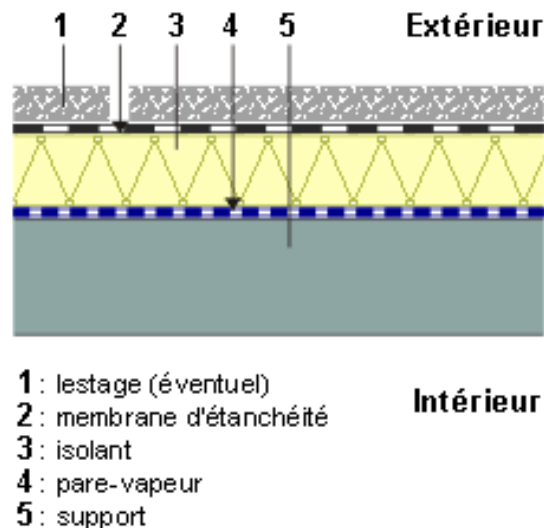
➤ **La toiture chaude :**

La toiture chaude désigne la toiture plate dont l'isolant est placé sur le support sans lame d'air entre les différentes couches.

L'isolant est recouvert par la membrane d'étanchéité, qui le protège. Il reste donc sec et conserve ainsi toutes ses caractéristiques thermiques.

Dans la plupart des cas un écran pare-vapeur doit être interposé entre le support et l'isolant. (En cas de rénovation, il peut s'agir de l'ancienne étanchéité que l'on décide de conserver).

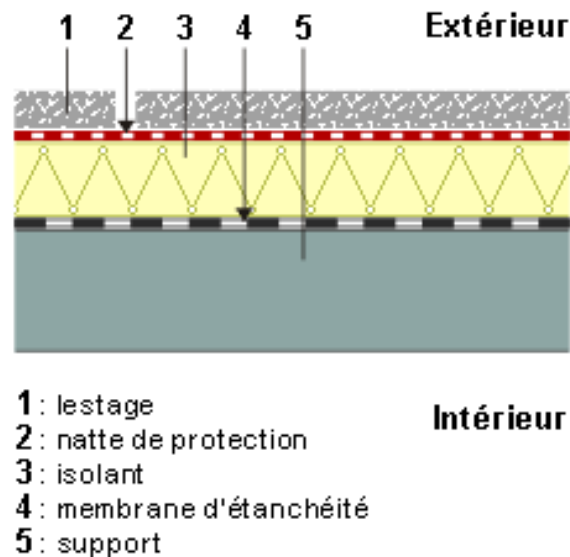
Le lestage n'est pas nécessaire. L'isolant et la membrane peuvent être fixés mécaniquement ou par collage. Il est dans ce cas relativement léger, et peut être appliqué sur des structures existantes qui ne supportent pas une augmentation de charge.



➤ **La toiture inversée**

La toiture chaude inversée désigne la toiture plate dont l'étanchéité est placée sur le support et dont l'isolant est posé sur l'étanchéité. L'isolant est donc mouillé par les eaux pluviales, ce qui diminue ses performances.

L'isolant est lesté.



En cas de rénovation, dans un but d'amélioration de l'isolation de la toiture, la membrane d'étanchéité existante peut être conservée, si elle est encore bonne.

La membrane d'étanchéité fait en même temps office de pare-vapeur. La technique de la toiture inversée protège la membrane d'étanchéité contre les chocs thermiques et le rayonnement ultraviolet, et de ce fait, ralentit son vieillissement.

Les structures porteuses en matières végétales ou en fibres organiques et minérales liées au moyen d'un liant minéral, doivent avoir une épaisseur minimale de 18 mm afin de garantir une résistance thermique minimale de $0.2 \text{ m}^2\text{K/W}$

Une couche filtrante d'une charge surfacique d'au moins 120 gr/m^2 est placée entre l'isolant et la couche de lestage et de protection. Cette couche filtrante doit permettre la diffusion de vapeur, retenir peu d'eau et en rompre le film. Elle doit résister aux intempéries et être imputrescible.

Il est déconseillé de poser deux couches d'isolant. Il peut, en effet, y avoir entre les deux couches un film d'eau qui agit en barrière de vapeur provoquant ainsi l'imprégnation de la couche inférieure par l'eau.

La couche filtrante et la couche d'usure doivent être perméables à la vapeur pour éviter le même phénomène.

➤ La toiture combinée

La toiture combinée consiste en un mélange des techniques "toiture chaude" et "toiture inversée".

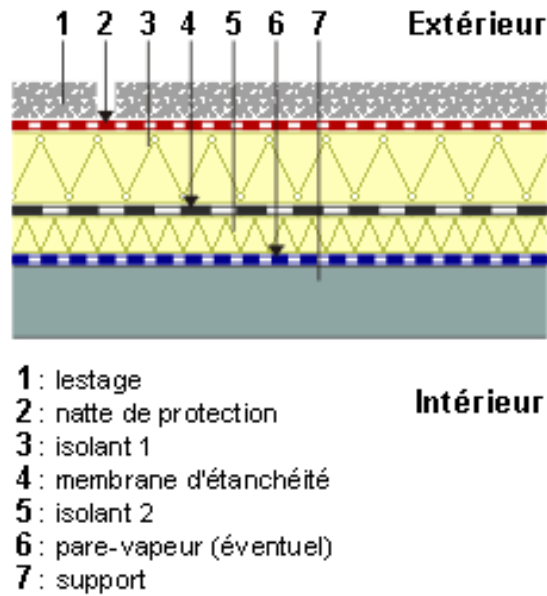
L'isolation est mise en place en deux couches.

La première couche d'isolant est recouverte par la membrane d'étanchéité.

La deuxième couche d'isolant est placée **sur** la membrane d'étanchéité. La technique de la toiture combinée protège ainsi la membrane d'étanchéité contre les chocs thermiques et le rayonnement ultraviolet, et de ce fait, ralentit son vieillissement.

Un écran pare-vapeur est parfois interposé entre le support et l'isolant inférieur. Celui-ci n'est pas nécessaire lorsque la résistance thermique de la couche supérieure est deux fois plus importante que la résistance thermique de la couche inférieure.

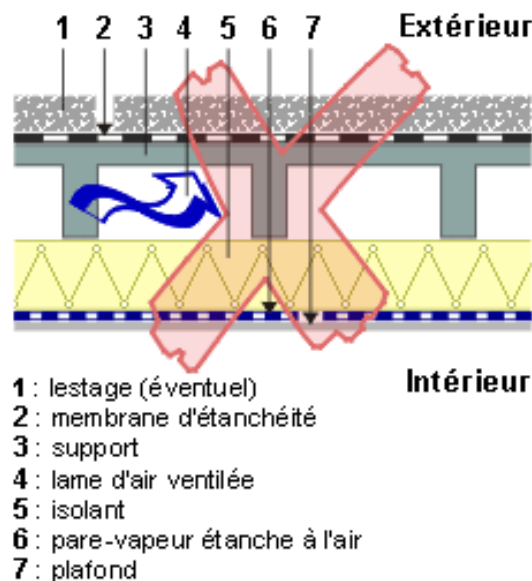
Le lestage est nécessaire.



➤ La toiture froide

La toiture froide désigne la toiture plate dont l'isolant est placé en dessous du support de l'étanchéité avec une lame d'air ventilée interposée.

Jadis régulièrement mis en œuvre, ce **système** est actuellement **complètement dépassé** et est à **proscrire**.



En effet, l'isolation d'une toiture plate par ce système provoque presque inévitablement de la condensation interne.

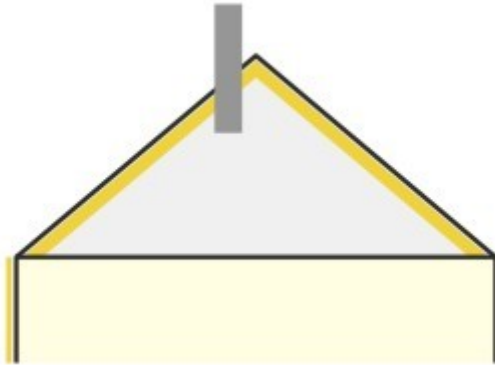
La vapeur d'eau qui migre de l'intérieur vers l'extérieur se condense sur le support d'étanchéité, dans l'isolant ou dans l'espace aéré et retombe sur l'isolant. La ventilation réelle de la lame d'air est souvent plus faible que celle nécessaire.

Le support d'étanchéité est parfois beaucoup plus froid que l'air extérieur de ventilation dont la vapeur se condense sur la face inférieure de l'étanchéité (sur refroidissement).

Lorsque le plafond n'est pas étanche à l'air, l'air intérieur chaud est aspiré dans l'espace ventilé et s'y condense d'autant plus que les courants d'air sont importants.

Cette condensation peut entraîner l'altération de l'isolant et la suppression de son efficacité, la pourriture des planchers, le gel des matériaux, le décollement ou le ramollissement des matériaux agglomérés, le développement de moisissures, etc.

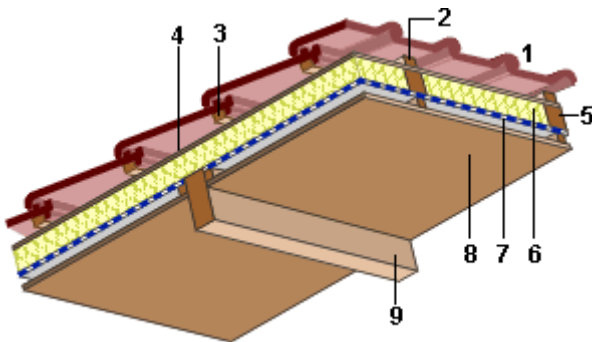
3.2.1.2. La toiture inclinée



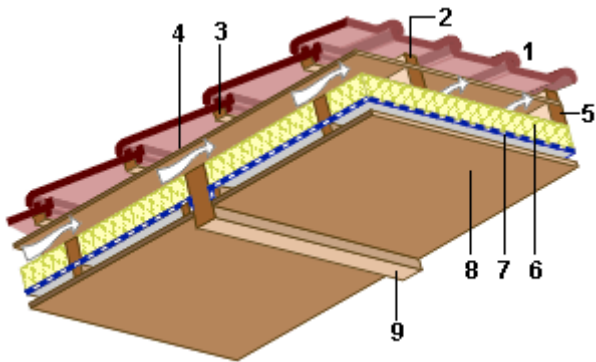
Les combles qui seront occupés et chauffés doivent être isolés de l'ambiance extérieure. Le toit incliné est dans ce cas la limite de l'espace protégé. C'est donc à ce niveau que doit être posé l'isolant et son pare-vapeur éventuel. L'isolant peut être situé entre les éléments de charpente et/ou en dessous de ceux-ci (isolation par l'intérieur), ou au-dessus des éléments de charpente (isolation par l'extérieur

a) Isolation par l'intérieur :

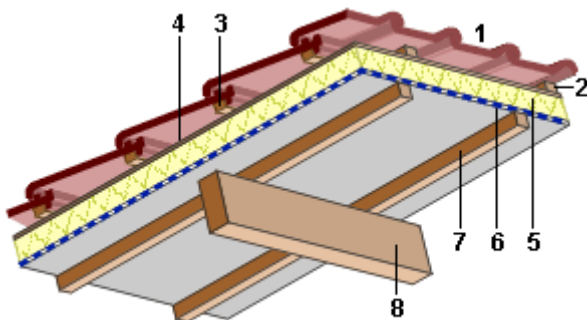
[1] Isolation entre chevrons ou fermettes



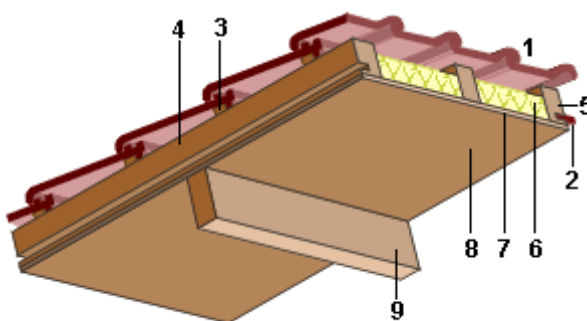
1. couverture
2. contre-lattes
3. lattes
4. sous-toiture
5. chevrons ou fermettes
6. isolant
7. pare-vapeur
8. finition intérieure
9. panne

[2] Isolation sous les chevrons ou les fermettes

1. couverture
2. contre-lattes
3. lattes
4. sous-toiture
5. chevrons ou fermettes
6. isolant
7. pare-vapeur
8. finition intérieure
9. pannes

b) Isolation par l'extérieur :**[1] Isolation au-dessus des chevrons ou des fermettes**

1. couverture
2. contre-lattes
3. lattes
4. sous-toiture
5. isolant
6. pare-vapeur
7. chevrons ou fermettes
8. pannes

[2] Isolation au-dessus des pannes à l'aide de panneaux préfabriqués

1. couverture
2. languette d'assemblage
3. lattes
4. panneau de toiture préfabriqué
5. raidisseurs du panneau
6. isolant du panneau
7. pare-vapeur intégré éventuel
8. plaque inférieure du panneau
9. pannes

Les Murs**1) L'isolation par l'intérieur****Les différents systèmes**

On rencontre principalement :

- les systèmes à plaques de plâtre,
- et le système à contre-cloison maçonnée.

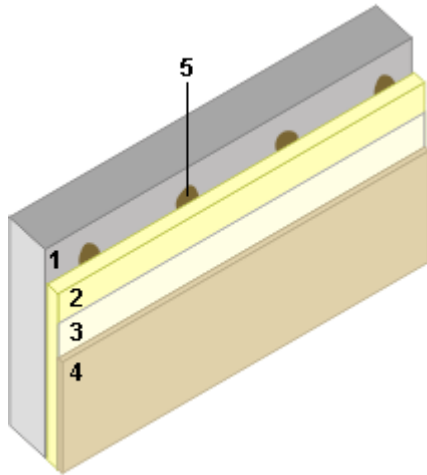
Il existe de nombreuses variantes. Nous n'entrerons pas dans le détail de toutes celles-ci.

a. Les systèmes à plaques de plâtre

⇒ Les panneaux isolants complexes

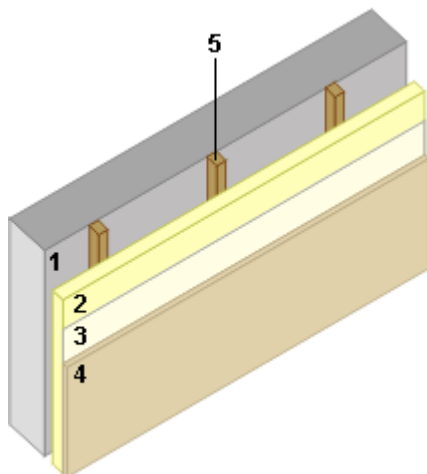
Le panneau complexe préfabriqué comprend un isolant revêtu d'une plaque de finition. Dans certains panneaux, lors de la fabrication, un pare-vapeur est inséré entre l'isolant et la finition.

Les panneaux isolants complexes posés par collage



1. Maçonnerie.
- Panneau complexe constitué de :
2. Isolation thermique.
 3. Pare-vapeur éventuel.
 4. Panneau de finition.
 5. Plots de colle.

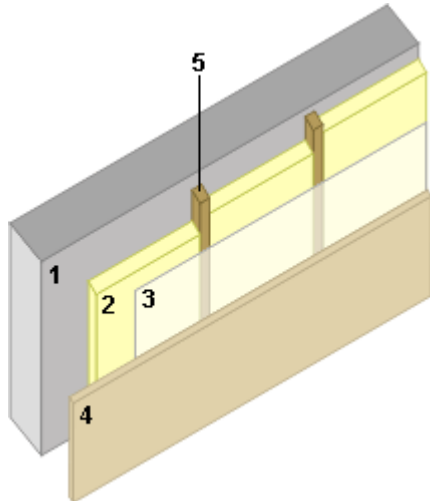
Les panneaux isolants complexes posés sur lattage



1. Maçonnerie.
- Panneau complexe constitué de :
2. Isolation thermique.
 3. Pare-vapeur éventuel.
 4. Panneau de finition.
 5. Lattes.

En variante à ce système, les fabricants proposent souvent des profilés métalliques à la place des lattes en bois.

⇒ **Les panneaux isolants revêtus sur chantier par des plaques de plâtre**



1. Maçonnerie.
2. Isolation thermique.
3. Pare-vapeur éventuel.
4. Panneau de finition.
5. Lattes.

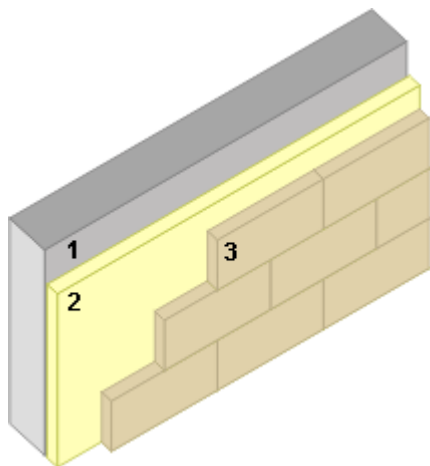
Pour ce système aussi, les fabricants proposent souvent des profilés métalliques à la place des lattes en bois.

b. Les isolants derrière contre-cloison maçonnée

Une paroi auto-stable est disposée à l'intérieur, parallèlement et à une certaine distance du mur. Les matériaux les plus utilisés sont :

- les briques de terre cuite (briques plâtrières),
- les carreaux de plâtre,
- les blocs de béton,
- les sandwiches plaques plâtre et âme cartonnée alvéolaire.

L'isolant est incorporé entre la contre-cloison et le mur. Il peut s'agir de polystyrène expansé, de laine minérale semi-rigide ou de polyuréthane expansé.



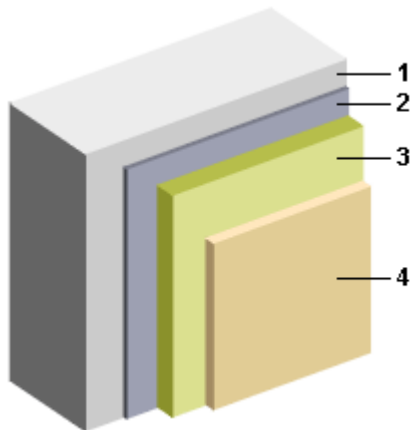
1. Mur.
2. Isolant.
3. Carreaux de plâtre.

2) L'isolation par l'extérieur

⇒ **L'enduit isolant**

L'enduit isolant consiste en une couche isolante constituée par un mortier composé de granulés (polystyrène expansé et/ou perlite, ...) et d'un liant de type ciment. Si le mur est très absorbant, un mortier d'accrochage est préalablement projeté sur celui-ci pour assurer une bonne adhérence entre le support et l'enduit isolant. La couche isolante est ensuite

recouverte d'une couche de finition le plus souvent à base d'un liant hydraulique (cimentage).



1. Mur plein.
2. Couche d'accrochage.
3. Enduit isolant.
4. Enduit minéral décoratif.

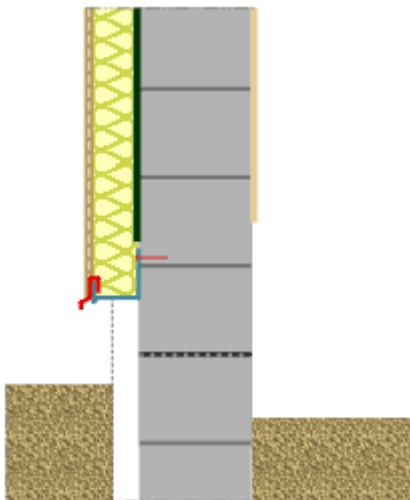
⇒ Le panneau isolant revêtu d'un enduit + Mise en œuvre

Ce système est le plus courant.

Il est constitué :

- De panneaux de polystyrène expansé, de panneaux semi-rigides de laine minérale, de verre cellulaire ou de polyuréthane, ... Ces panneaux sont collés et/ou fixés mécaniquement au support.
- D'un enduit de finition armé d'un treillis synthétique ou métallique.

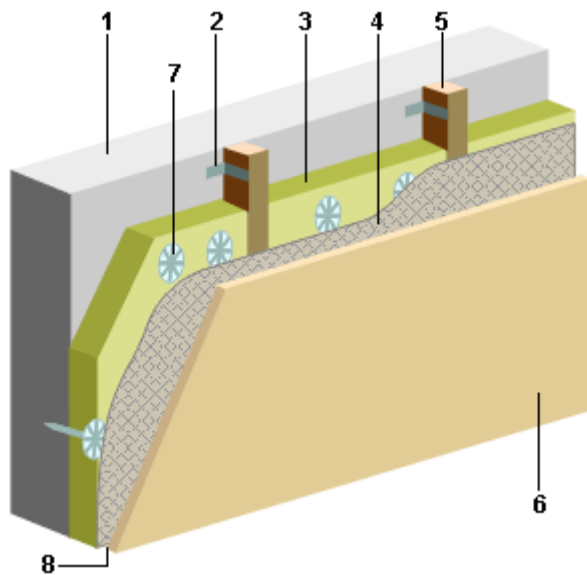
Remarque : ci-dessous, on n'a représenté que la partie courante du mur. L'isolation par l'extérieur de la partie du mur enterré n'est pas représentée ici.



1. Mur plein.
2. Mortier de collage de l'isolant.
3. Panneau d'isolation.
4. Armature synthétique ou métallique + sous-couche de l'enduit.
5. Enduit de finition.
6. Profilé de socle.

⇒ Les panneaux d'isolation complétés d'une structure supportant l'enduit

Cette technique se rapproche de la précédente, mais l'isolant est disposé entre les éléments d'une structure. Cette structure sert de support à l'armature de l'enduit. L'enduit est le plus souvent minéral et est indépendant de l'isolant.

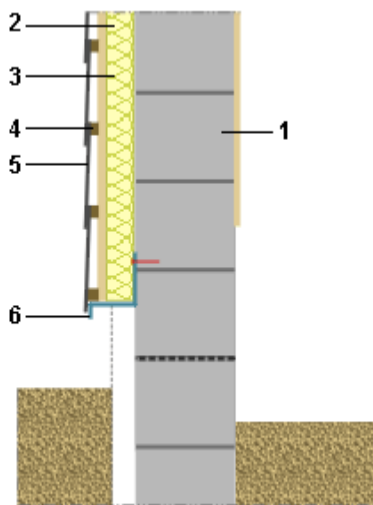


1. *Maçonnerie monolithique ou voile de béton + ancien enduit éventuel.*
2. *Ancrages.*
3. *Isolant thermique.*
4. *Armature de l'enduit.*
5. *Ossature.*
6. *Enduit (sous-couche + finition).*
7. *Fixation de l'isolant.*
8. *Lame d'air (ventilée ou non).*

⇒ L'isolation thermique protégée par un bardage

Ce système est identique au précédent sauf que l'enduit armé est remplacé par un bardage (ardoise, lamelles métalliques ou plastiques, revêtement en bois, ...) fixé sur l'ossature.

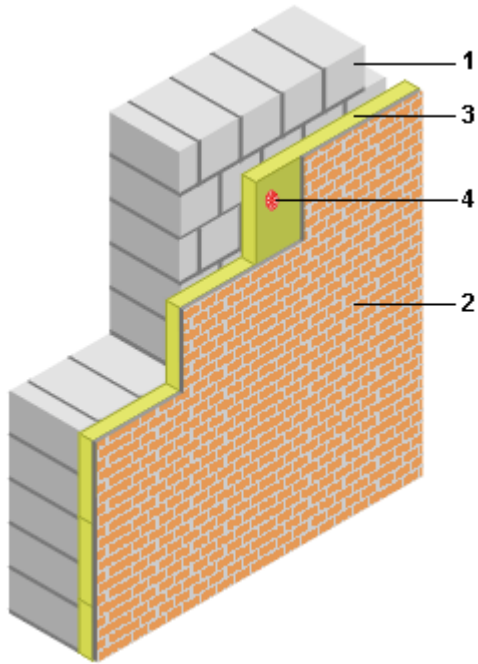
Remarque : ci-dessous, on n'a représenté que la partie courante du mur. L'isolation par l'extérieur de la partie du mur enterré n'est pas représentée ici.



1. *Maçonnerie existante*
2. *Structure (bois ou métallique) verticale ou horizontale selon le type de bardage, ayant l'épaisseur de l'isolant*
3. *Isolant thermique posé entre lattes et fixé mécaniquement à la paroi (chevilles)*
4. *Lattage fixé transversalement à la structure*
5. *Bardage (ardoises naturelles ou synthétiques, bois, feuilles métalliques...)*
6. *Bavette pour évacuer les eaux infiltrées vers l'extérieur.*

⇒ Les éléments isolants préfabriqués

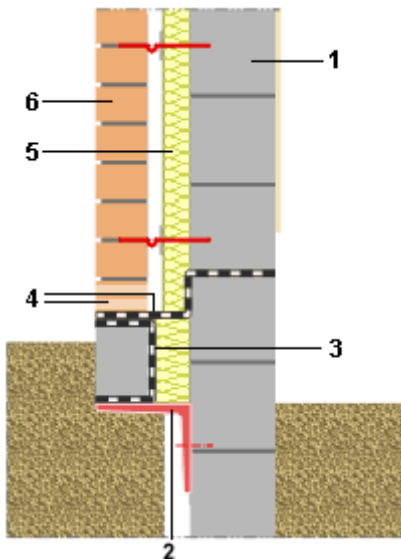
Ce système est constitué de panneaux comportant une âme isolante et un revêtement métallique, synthétique, minéral ou des plaquettes de brique. Les panneaux sont fixés mécaniquement sur le mur.



1. Mur porteur.
2. Plaquette de brique.
3. Isolant.
4. Fixation mécanique.

Création d'un mur creux isolé

Un isolant est posé contre le mur plein. Il est fixé mécaniquement à la paroi à l'aide de crochets et rondelles. Un mur de parement est monté devant l'isolant en laissant ou non un espace formant coulisse, dans ce cas, celle-ci a une épaisseur de 2 à 3 cm. Le mur de parement est également relié mécaniquement au mur porteur via les crochets. Les déchets de mortier dans la coulisse sont enlevés au fur et à mesure de l'élévation du parement. On obtient ainsi un réel mur creux "moderne".

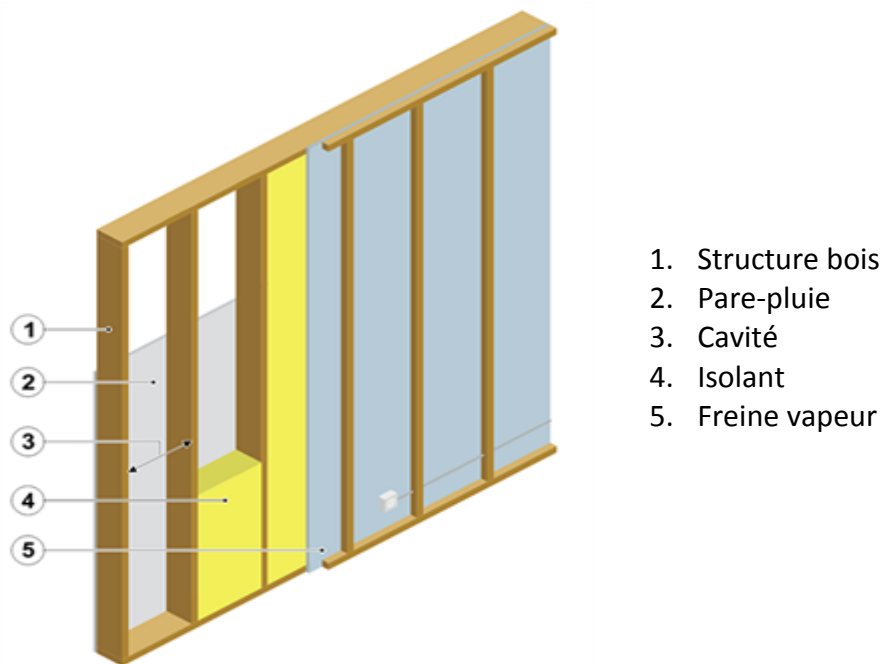


1. Maçonnerie existante.
2. Cornière métallique avec protection anti-corrosion, ancrée mécaniquement au mur porteur.
3. Membrane d'étanchéité pour protéger l'isolant contre l'humidité.
4. Membrane d'étanchéité collée au mur porteur et engravée, et joint vertical ouvert.
5. Isolant thermique.
6. Mur de parement.

L'isolation à l'intérieur de l'ossature en bois d'un mur

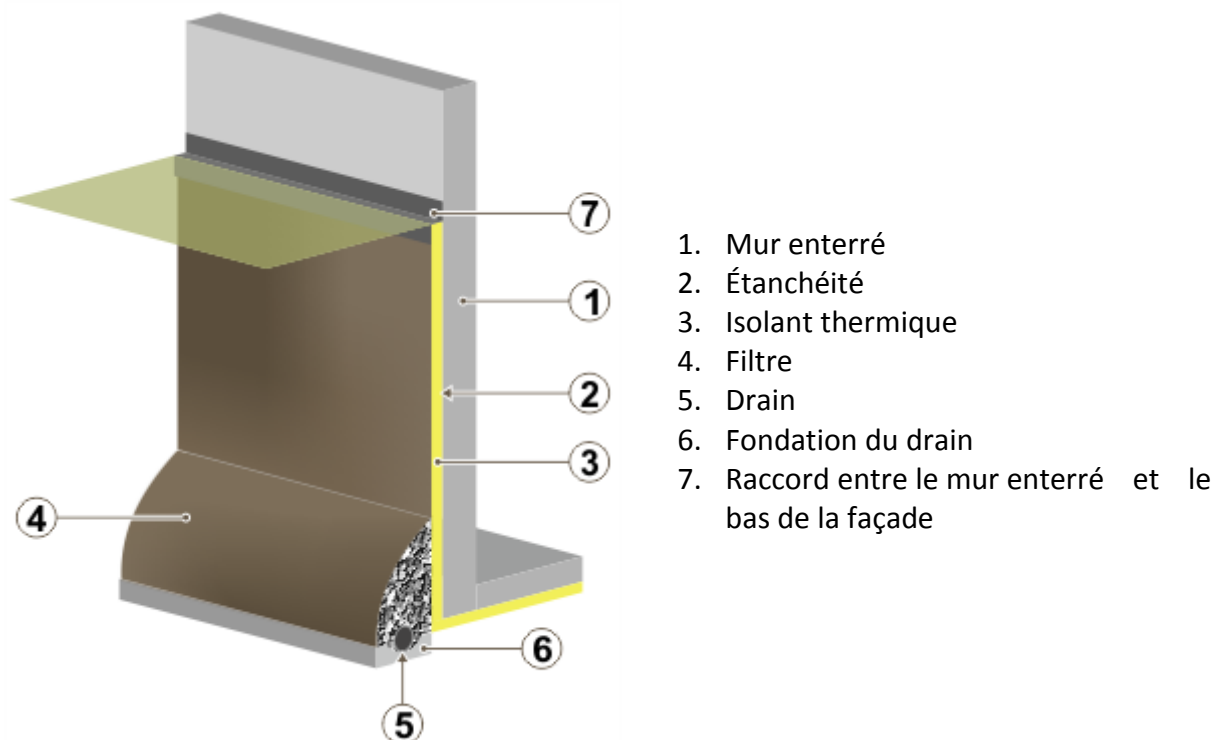
Principe technique

On profite de l'espace disponible entre les éléments de l'ossature pour poser un maximum d'isolant.



L'isolation enterrée

La pose de l'isolant sur la face extérieure des parois appartenant à l'enveloppe du volume protégé amène de nombreux avantages : continuité de l'isolant ; maintien de la paroi à une température constante intérieure ; moins de risque de condensation interne ; meilleure inertie thermique ; etc. C'est également le cas pour les murs contre terre.



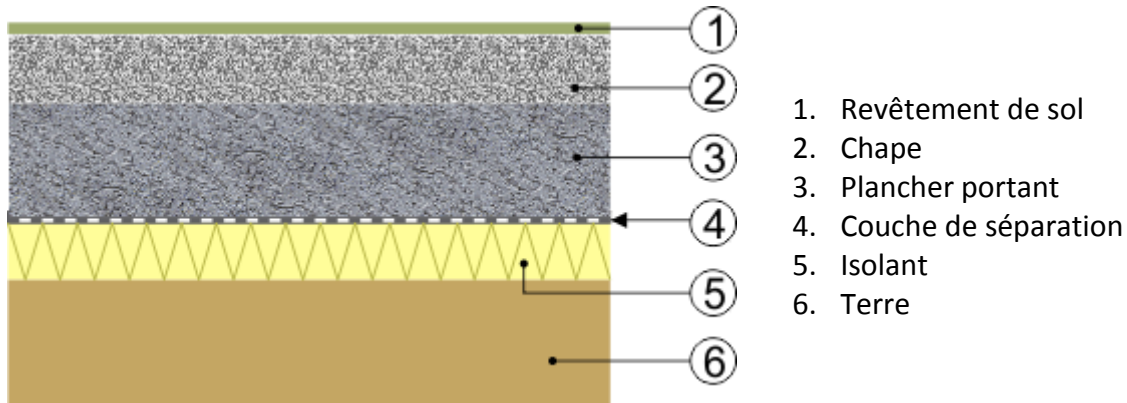
Les planchers inférieurs

⇒ L'isolation sous le plancher sur sol

Principe technique

La pose de l'isolant sur la face extérieure des parois délimitant le volume protégé amène de nombreux avantages : continuité de l'isolant, maintien de la paroi à une température constante intérieure, moins de risque de condensation interne, meilleure inertie thermique, etc. C'est également le cas pour les planchers contre terre.

Schémas de principe

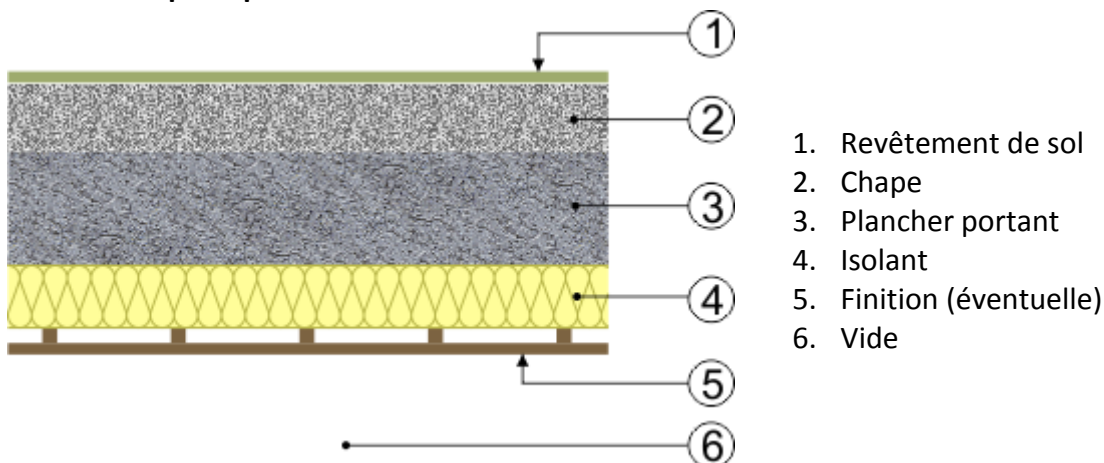


⇒ L'isolation sous le plancher sur vide

Principe technique

La pose de l'isolant sur la face extérieure des parois délimitant volume protégé amène de nombreux avantages : continuité de l'isolant, maintien de la paroi à une température constante intérieure, moins de risque de condensation interne, meilleure inertie thermique, etc. C'est également le cas pour les planchers situés au-dessus du vide.

Schémas de principe

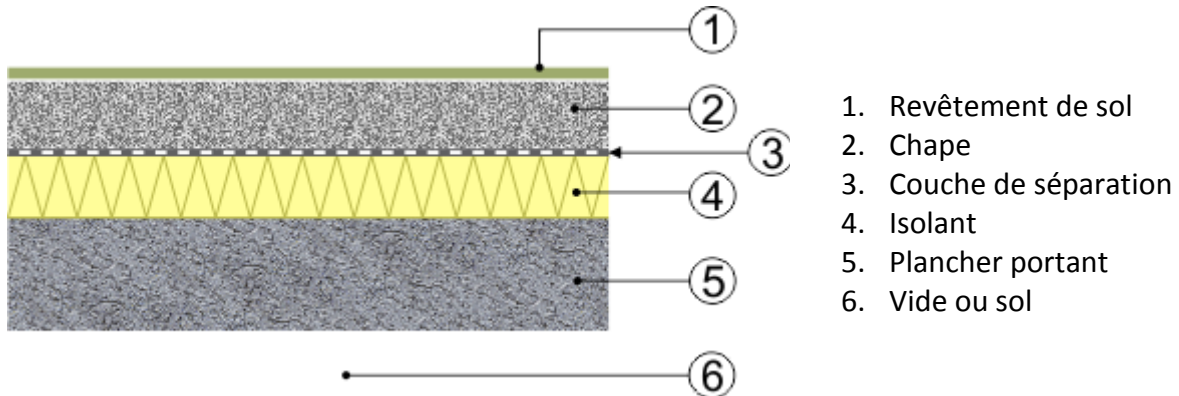


⇒ L'isolation au-dessus du plancher support, sous l'aire de foulée

Principe technique

L'isolant est posé sur le support du plancher (béton armé, hourdis, ...). Sur l'isolant est posée l'aire de foulée (chape + finition, panneaux, ...). La chape peut être chauffante. C'est cette configuration qui peut s'appliquer tant pour les planchers sur sol que pour les planchers sur vide.

Schémas de principe



⇒ L'isolation à l'intérieur de l'ossature d'un plancher inférieur

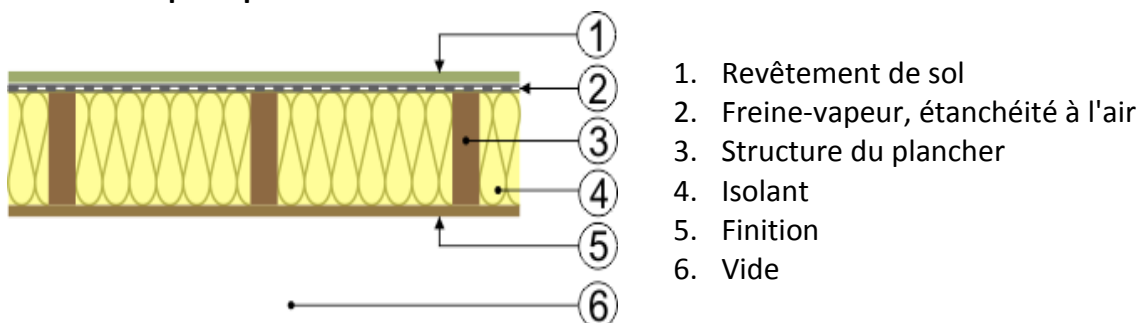
Principe technique

On profite de l'espace disponible entre les éléments de l'ossature pour poser un maximum d'isolant.

1. L'isolant peut être placé en matelas fabriqués en usine. Ceux-ci sont découpés à la forme des cavités présentes dans la paroi. La fermeture d'une des faces de ces cavités par des panneaux ou des membranes se fait avant la pose de l'isolant.
2. La pose de l'isolant peut également se faire par dépose de flocons ou de billes en vrac dans les cavités. Ce travail doit être confié à un entrepreneur spécialisé, car, pour que la pose soit correcte, il nécessite une bonne expérience et un outillage adapté. On évite ainsi que l'isolant soit insuffisamment ou trop tassé, voir mal réparti. La face inférieure du plancher est posée avant placement de l'isolant. La face supérieure est généralement posée lorsque l'isolant est en place.

Les isolants généralement utilisés seront suffisamment souples et élastiques pour assurer un calfeutrement parfait contre les éléments de structures. Ainsi des fibres organiques ou minérales conviennent parfaitement. On sera cependant très attentif à prévoir du côté intérieur (côté chaud de l'isolant) un freine-vapeur ou pare-vapeur adapté à l'hygroscopicité de l'isolant à la perméabilité à la vapeur de la finition extérieure et aux caractéristiques du climat intérieur. Cette protection indispensable fera également office de barrière d'étanchéité à l'air, point faible des parois à ossature.

Schémas de principe



Conclusion :

Le confort thermique dépend de 6 paramètres

1. Le métabolisme, qui est la production de chaleur interne au corps humain permettant de maintenir celui-ci autour de $36,7^{\circ}\text{C}$. Un métabolisme de travail correspondant à une activité particulière s'ajoute au métabolisme de base du corps au repos.
2. L'habillement, qui représente une résistance thermique aux échanges de chaleur entre la surface de la peau et l'environnement.
3. La température ambiante de l'air T_a .
4. La température moyenne des parois T_p .
5. L'humidité relative de l'air (HR), qui est le rapport exprimé en pourcentage entre la quantité d'eau contenue dans l'air à la température t_a et la quantité maximale d'eau contenue à la même température.
6. 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 $0,2 \text{ m/s}$.