

Thierry **Gallauziaux** | David **Fedullo**

L'isolation thermique

© Groupe Eyrolles, 2011. ISBN : 978-2-212-13204-5

EYROLLES

SOMMAIRE

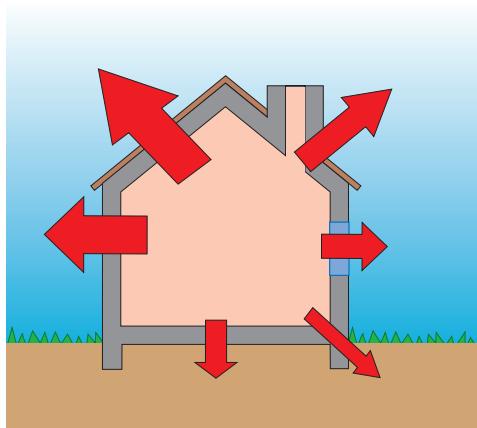
POURQUOI ISOLER ?

La thermique dans l'habitat	11	Les labels	43
Les performances thermiques des matériaux.....	11	Le label Performance.....	44
Les échanges gazeux.....	18	Le label Effinergie.....	45
La vapeur d'eau.....	18	Le label Passivhaus.....	46
L'étanchéité à l'air.....	25	Le label Minergie.....	48
Les déperditions thermiques.....	29	Le diagnostic de performances énergétiques	50
L'inertie thermique.....	31		
Le principe de l'inertie thermique	31		
L'amélioration de l'inertie thermique.....	37		
La réglementation thermique	39	LES PRINCIPES ET LES MATÉRIAUX D'ISOLATION	
		Le principe de l'isolation thermique	53
		Les ponts thermiques	57
		La certification et les labels des isolants	63



La certification des performances	63	Les vitrages	121
Les labels écologiques	68	Les menuiseries	125
Les caractéristiques environnementales	69	Les certifications	128
Le choix des isolants	69	Les solutions d'isolation et leurs performances	131
Les isolants rapportés	70	Les solutions d'isolation des parois verticales	132
Les isolants synthétiques	70	L'isolation rapportée par l'intérieur	132
Le polystyrène expansé	70	Les complexes de doublage	133
Le polystyrène extrudé	72	L'isolation avec ossature	135
Les polyuréthanes	74	L'isolation avec contre-cloison	138
Les isolants minéraux	75	Les performances thermiques de l'isolation par l'intérieur	138
La laine de verre	75	L'isolation répartie	144
La laine de roche	78	L'isolation par l'extérieur (ITE)	148
Le verre cellulaire	79	L'isolation par l'extérieur avec un enduit	149
Les isolants d'origine végétale	81	Les bardages rapportés sur ossature secondaire	153
Le chanvre	82	Les structures légères isolées de séparation des locaux non chauffés	157
La chènevotte	84		
Le liège	86	L'isolation thermique des planchers bas	158
La laine de coton	88	Les planchers sur terre-plein	158
La ouate de cellulose	90	Les planchers bas sur vide sanitaire ou local non chauffé	161
Les isolants à base de bois	94	Les planchers avec entrevoûts en polystyrène	161
Les isolants d'origine animale	97	L'isolation thermique des planchers par une chape flottante	163
La laine de mouton	97	L'isolation des planchers par le dessous	165
La plume de canard	99		
Le cas des isolants réflecteurs multicouches	101	L'isolation des toitures inclinées	167
L'isolation répartie	103	L'isolation des combles perdus	169
Le béton cellulaire	104	L'isolation des combles aménageables	174
Les blocs bimatières	109		
Les blocs monomurs en pierre ponce	111		
Les blocs monomurs en billes d'argile expansée	114		
Les blocs monomurs en terre cuite	114		
Les menuiseries extérieures	118		
Les performances des menuiseries	119		

L'isolation monocouche en rénovation.....	176	Les dalles sur terre-plein et les radiers.....	295
L'isolation en deux couches en rénovation.....	178	Les planchers bas isolants.....	302
L'isolation des combles neufs aménageables avec pare-vapeur hygrorégulant	181	Le traitement des ponts thermiques des planchers.....	306
L'isolation extérieure des combles aménageables (sarking).....	183	La chape flottante.....	317
L'isolation des combles avec des panneaux de toiture.....	183	L'isolation en sous-face	323
L'isolation des toitures-terrasses	188	Les faux-plafonds.....	323
La ventilation.....	190	Les panneaux rapportés.....	335
Les systèmes de ventilation.....	191	Les toitures.....	337
Le puits canadien	198	Les combles.....	337
LES MISES EN ŒUVRE			
Les parois verticales.....	206	Les évolutions de la réglementation pour les combles.....	337
L'isolation thermique par l'intérieur	207	Les combles perdus.....	338
Les complexes isolants	209	L'isolation sur plancher.....	339
L'isolation derrière ossature métallique	223	L'isolation entre solives ou fermettes	342
Les finitions des plaques de plâtre.....	243	L'isolation répandue ou soufflée.....	345
Les contre-cloisons maçonneries	249	Les combles aménageables	348
L'isolation thermique extérieure (ITE)	254	Les ossatures métalliques	351
L'isolation support d'enduit	255	L'isolation monocouche sous chevrons en rénovation	357
L'ITE avec support d'enduit mince	259	L'isolation en deux couches.....	362
L'ITE avec support d'enduit épais	266	<i>La solution sans écran sous toiture</i>	362
Les détails constructifs communs à toutes les solutions d'ITE	267	<i>L'isolation avec pare-vapeur hygrorégulant</i>	366
L'isolation sous bardage rapporté	276	Le traitement des points singuliers	376
Les planchers	295	Le sarking	376
Les panneaux de toiture	388	La mise en œuvre des panneaux sandwiches	395
La mise en œuvre des panneaux sandwiches	395	La mise en œuvre des caissons chevronnés	401
Index	409		



POURQUOI ISOLER ?

La question de l'isolation des bâtiments peut paraître évidente, pour de nombreuses raisons que nous pensons tous connaître plus ou moins. Chacun se représente aisément ce qu'est un logement isolé et pourquoi il est opportun de le faire. Cependant, isoler est une problématique relativement récente et parfois sujette à des idées reçues ou à des approximations. Le sujet ne peut pas être traité sans une vision globale des processus d'accumulation et d'échange de la chaleur entre l'habitat et son environnement, ce qui va au-delà de la simple opération qui consiste à coller un complexe isolant sur un mur.

Après la Seconde Guerre mondiale, le besoin de reconstruction a entraîné l'augmentation du nombre de logements, de la surface moyenne par habitant et du niveau de confort. Le développement économique rapide privilégiait les solutions bon marché. L'énergie était disponible en grande

quantité à faible coût si bien que le principe d'isoler les logements était tout simplement ignoré. Ne correspondant à aucune réalité économique, la question ne se posait pas. L'énergie était perçue comme une ressource disponible pour toujours. Les considérations écologiques avaient également

un sens tout autre qu'aujourd'hui et l'impact sur le climat était inconnu. Le premier choc pétrolier de 1973 a été une révélation et une prise de conscience que le pétrole était une ressource limitée. Avec l'envolée des prix est apparue la nécessité de réaliser des économies en réduisant la consommation d'énergie. C'est ainsi que sont apparues la « chasse au gaspi » et la première réglementation thermique en France, en 1974. On commença à isoler les combles, les murs et à promouvoir les doubles vitrages dans les constructions neuves. La réhabilitation du parc existant a également été encouragée. Au cours des trente années qui ont suivi, la performance thermique des bâtiments a ainsi progressé de 34 %. La consommation moyenne en énergie totale d'un logement est passée de près de 400 kWh/m²/an à moins de 250 kWh/m²/an.

Si ce bilan semble en apparence satisfaisant, il masque une réalité tout autre. Durant la même période, la consommation d'énergie finale dans le bâtiment a augmenté de 24 % en volume. La raison est due à l'augmentation de la surface moyenne et du nombre de logements et de bâtiments tertiaires et au développement du confort en termes d'équipement électroménager et de climatisation. Aujourd'hui encore, le bâtiment représente 46 % de la consommation d'énergie finale, loin devant les transports et l'industrie. Dans cette part de consommation, les maisons individuelles représentent à elles seules 42 %. 70 % de l'énergie consommée dans les bâtiments est destinée au chauffage et à la climati-

sation (figure 1). Le gisement d'économies est donc immense, notamment dans les logements construits avant 1974.

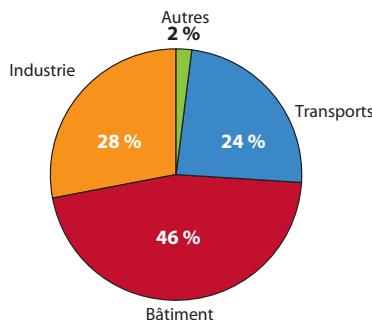
Outre la raréfaction et la fluctuation du prix des énergies fossiles, une autre problématique est apparue : l'environnement et le changement climatique. Contestée dans les années 1990, l'influence des activités humaines sur le climat est une réalité que plus personne ne nie. La communauté scientifique internationale a officiellement reconnu cette influence néfaste en 2007. Depuis le début des statistiques météorologiques, les dix années les plus chaudes ont été constatées après 1991. Les glaces polaires fondent à un rythme de plus en plus rapide et les organisations non gouvernementales déplorent l'augmentation des réfugiés climatiques.

La nécessité de réduire les émissions du principal gaz à effet de serre, le CO₂, et de préserver l'environnement accentue dramatiquement les enjeux énergétiques. Le bâtiment est, en France, la deuxième source de pollution par le CO₂, soit une émission globale correspondant à environ 100 millions de tonnes par an, ce qui représente une augmentation de 20 % par rapport aux émissions de 1990. Les constructions mal isolées sont encore une fois très largement responsables de cet état de fait.

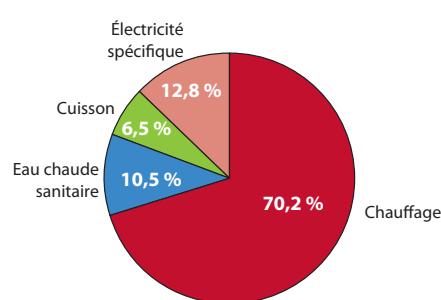
Les turbulences sur les marchés de l'énergie ont des répercussions dans tous les secteurs et des solutions contradictoires ou fausses apparaissent. Le débat sur l'utilité des agrocarburants ou des cultures OGM en

Consommation d'énergie dans la construction

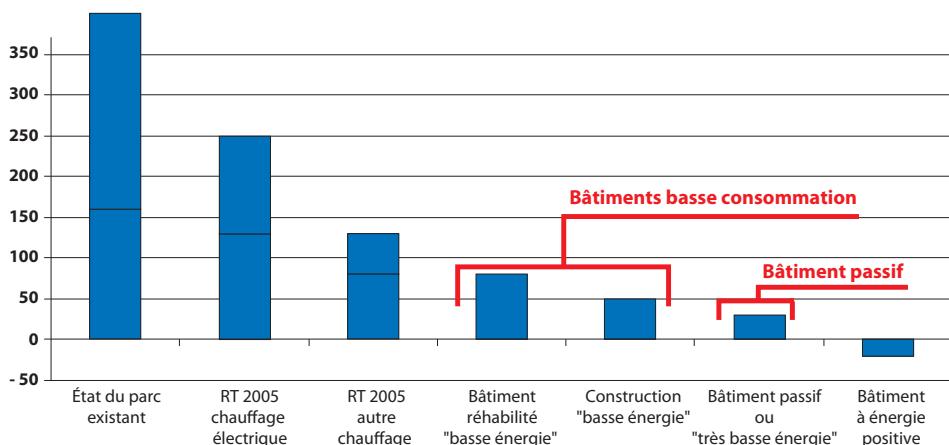
Consommation d'énergie finale en France



Consommation d'énergie dans l'habitat



Consommation en kWhep/m²/an pour le chauffage, la production d'eau chaude sanitaire, la climatisation et la ventilation (consommation en kWhep/m²/an - ep : équivalent pétrole) (Source Effinergie)



Comparaison avec l'Allemagne (consommation en kWhep/m²/an)

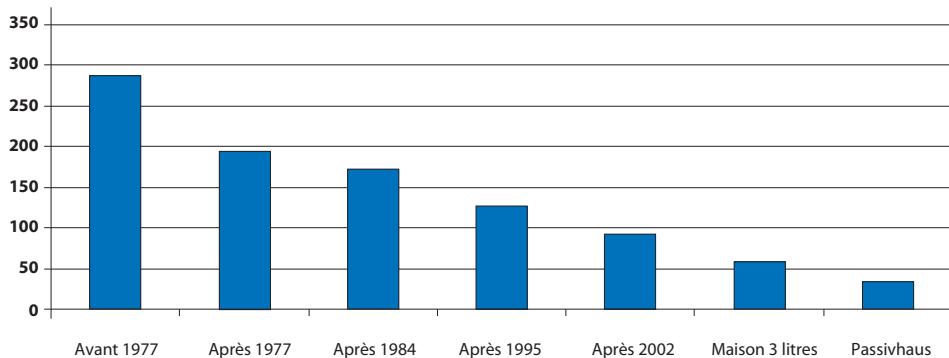


Figure 1 : La consommation d'énergie dans la construction

sont des exemples. La fabrication de combustibles à partir de produits issus de l'agriculture entraîne des effets en cascade sur l'alimentation mondiale et contribue à la déforestation. Par exemple, en Indonésie, la production de l'huile de palme favorise cette tendance et contribue à amplifier les effets sur le climat. La montée des prix réveille la spéculation et la recherche du profit maximal.

La déforestation s'accélère sur pratiquement tous les continents. Au Canada, l'exploitation des sables bitumineux pour en extraire le pétrole rase de vastes étendues boisées, provoque des effets catastrophiques sur l'environnement et sur le climat et dégage d'énormes quantités de gaz à effet de serre.

D'autres effets en chaîne sont à craindre selon les scientifiques, par exemple, si la température moyenne dans le Grand Nord atteint un niveau critique, le permafrost, la partie de terre perpétuellement gelée, pourrait fondre et libérer des quantités gigantesques de méthane dans l'atmosphère. Le groupe intergouvernemental d'experts sur l'évolution du climat des Nations Unies estime qu'une plus grande efficacité énergétique dans les bâtiments et l'industrie pourrait réduire la pollution en CO₂ de plus d'un milliard de tonnes par an. Les perspectives définies par l'Union européenne visent à diminuer de 20 % les émissions de gaz à effet de serre d'ici 2020 par rapport à 1990. À la même échéance, la consommation d'énergie devra avoir baissé de 20 % et la part des énergies renouvelables

devra atteindre également 20 % de l'énergie finale consommée. Les pays les plus industrialisés s'en tiennent aux promesses, et proposent de réduire de moitié leurs émissions à l'horizon 2050 tandis que les pays émergents reci- gnent à s'engager.

Le constat est connu, les volontés et les solutions existent. En France, les bâtiments publics et tertiaires doivent être construits pour répondre aux normes basse consommation (50 kWh/m²/an). La réglementation thermique vise, à l'horizon 2020, à atteindre le niveau de construction passif ou à énergie positive pour les logements. Pourtant les mesures sont prises à des rythmes qui varient d'un État à un autre. En effet, les intérêts et les lobbies nucléaires, pétroliers, industriels et écologiques divergent. Les discours, y compris marketing, tendent globalement à prôner les économies d'énergie, en contradiction parfois avec la réalité. Les mesures concernant l'existant dans le secteur privé, le plus gros réservoir d'économies, sont encore inexistantes, sauf en cas de rénovation lourde.

Une isolation réellement efficace des logements est possible, pour atteindre une consommation quasi nulle d'énergie de chauffage. L'Europe du Nord est pionnière dans ce domaine et nous propose de nombreuses solutions adaptables sur le marché français.

Par conséquent, l'enjeu dépend de la volonté politique, des investissements en recherche et développement des industriels, de la

formation des professionnels et de l'information objective du public. L'isolation est également un moyen d'augmenter le confort de son habitation en hiver comme en été. Une maison bien isolée nécessite généralement moins d'entretien (système de chauffage, meilleure aération évitant les condensations) et améliore les performances acoustiques.

Les solutions acoustiques sont souvent combinées ou communes aux solutions thermiques, c'est pourquoi elles seront également abordées dans cet ouvrage.

LA THERMIQUE DANS L'HABITAT

Une habitation est un ensemble composé de divers matériaux en contact avec un environnement plus ou moins froid ou chaud en fonction de la saison, de l'heure ou des conditions météorologiques. Les transferts de chaleur et les échanges gazeux se produisent en permanence. Si l'environnement des habitations était constant et tempéré, la température intérieure pourrait être égale à la température extérieure. Comme tel n'est pas le cas, et pour satisfaire le confort des habitants, il convient de réguler les échanges thermiques, en tentant de rétablir des conditions idéales d'habitabilité. Pour ce faire, il est nécessaire de dépenser de l'énergie ou de contrôler les flux, notamment grâce à l'isolation. En

plus de l'isolation, d'autres paramètres sont à considérer dans un projet de construction. Nous allons les aborder d'un point de vue plus global, celui de la thermique de l'habitat, afin de mieux comprendre les mécanismes et les règles applicables pour parvenir à un objectif d'efficacité énergétique.

Les performances thermiques des matériaux

Avant de traiter de l'isolation, des produits et des procédés de mise en œuvre, il est important de s'attarder sur quelques notions physiques concernant la thermique.

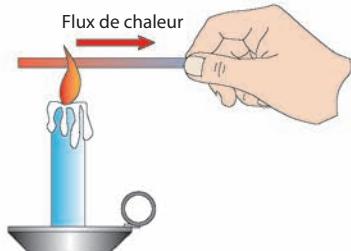
Dans un bâtiment comme dans tout corps solide, la chaleur se propage de trois façons différentes : par conduction, par convection ou par rayonnement (figure 2). Cela a des incidences directes sur la façon dont il faut concevoir un bâtiment et avec quels matériaux.

La **conduction** est la propagation de la chaleur à travers un ou plusieurs éléments en contact direct. Le sens du flux thermique va toujours de l'élément le plus chaud vers l'élément le plus froid. La quantité de chaleur qui se propage dans un corps, dans un temps donné, est proportionnelle à la conductivité thermique du matériau et à la différence de température entre les deux faces. S'il n'y a pas de différence de température, il n'y a pas de flux. En hiver, par exemple, dans un mur, le flux de chaleur va pénétrer dans la paroi à partir de l'intérieur, traverser les différentes couches de matériaux,

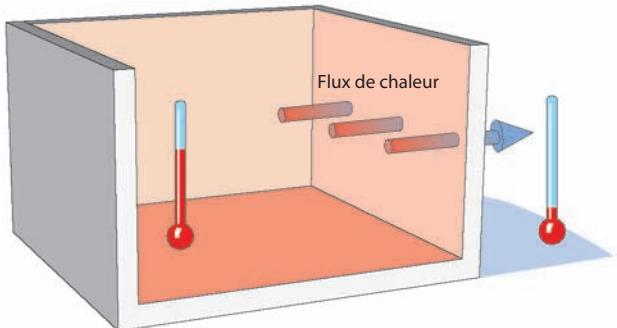
Les transferts de chaleur

La conduction

Principe

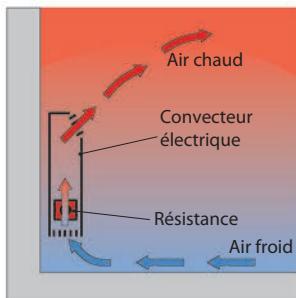


Au niveau d'une paroi

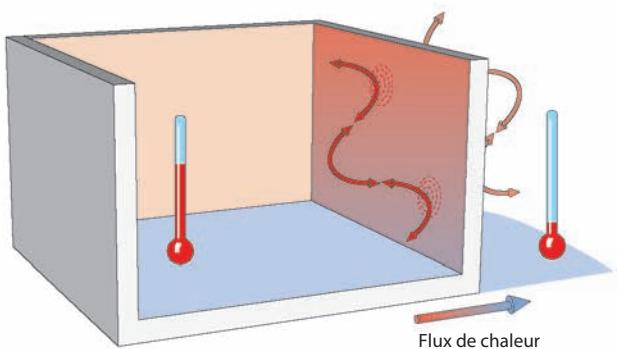


La convection

Principe



Au niveau d'une paroi

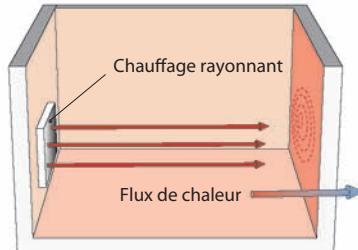


Le rayonnement

Principe



Au niveau d'une paroi



Au niveau d'une habitation

Apports solaires en hiver,
surchauffe en été, inertie
thermique

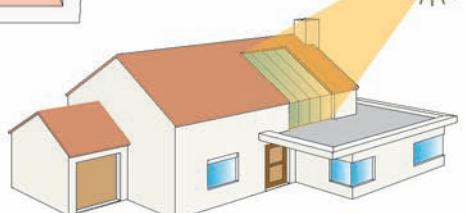


Figure 2 : Les modes de transfert de la chaleur

à différentes vitesses selon leur nature, et se propager à l'extérieur. Moins les matériaux sont conducteurs, plus la progression est lente. C'est l'effet recherché en hiver.

La **convection** est le transfert de la chaleur d'un corps solide vers un corps gazeux et inversement. La quantité de chaleur transmise dépend de la différence de température entre les éléments, de la vitesse de l'air et de la surface de contact. Par exemple, une paroi exposée à un vent froid et puissant se refroidira très rapidement.

Le **rayonnement** est le transfert de chaleur à travers un gaz ou le vide par rayonnement infrarouge.

Dans un bâtiment, les modes de transmission se combinent. La transmission de la chaleur de l'air ambiant à une paroi s'effectue en partie par rayonnement et en partie par convection. À l'intérieur de la paroi, la chaleur progresse par conduction.

Chaque matériau possède une **conductivité thermique** propre. Pour classer les matériaux selon ce critère, on utilise le coefficient lambda (λ). Il s'exprime en watts par mètre kelvin (W/m.K ou parfois en W/m. $^{\circ}$ C) et représente la quantité de chaleur traversant un mètre carré de matériau d'une épaisseur d'un mètre, soit un mètre cube, avec une différence de température d'un degré entre les deux faces, dans un temps donné. C'est une caractéristique constante et propre à chaque matériau. En notant le score obtenu par un mètre cube de chacun

des matériaux du bâtiment, on est sûr d'avoir une base de comparaison équitable permettant un classement objectif. C'est le rôle du coefficient lambda.

Plus la valeur de ce coefficient est faible, plus le matériau est isolant. Un matériau est considéré comme isolant si son coefficient lambda est inférieur à 0,06 W/m.K. La figure 3 indique la conductivité thermique de différents matériaux de construction.

Il est intéressant de noter que la conductivité de l'air est de 0,02 W/m.K et que celle de l'eau est de 0,56 W/m.K. Par conséquent, un même matériau présentera des valeurs totalement différentes selon qu'il est sec ou humide. C'est pourquoi, avant d'isoler un mur humide, il convient de l'assécher ou de stopper la source d'humidité. De même, un isolant hydrophile en contact avec une fuite ou une infiltration perdra la majeure partie de sa capacité d'isolation. Pour les calculs thermiques sont retenues les valeurs utiles de conductivité thermique qui tiennent compte de l'influence de l'humidité. Cette valeur apparaît sur les étiquettes des produits isolants et doit faire l'objet d'une certification. Pour tous les isolants, ce coefficient doit être indiqué par son fabricant et le sera dans la suite de cet ouvrage pour chaque isolant présenté. Rappelez-vous, plus le coefficient λ d'un matériau est petit, plus grand est son pouvoir isolant.

Grâce à ce coefficient, on peut calculer d'autres caractéristiques, comme la résistance thermique d'une paroi homogène d'épaisseur donnée.

La conductivité thermique de différents matériaux

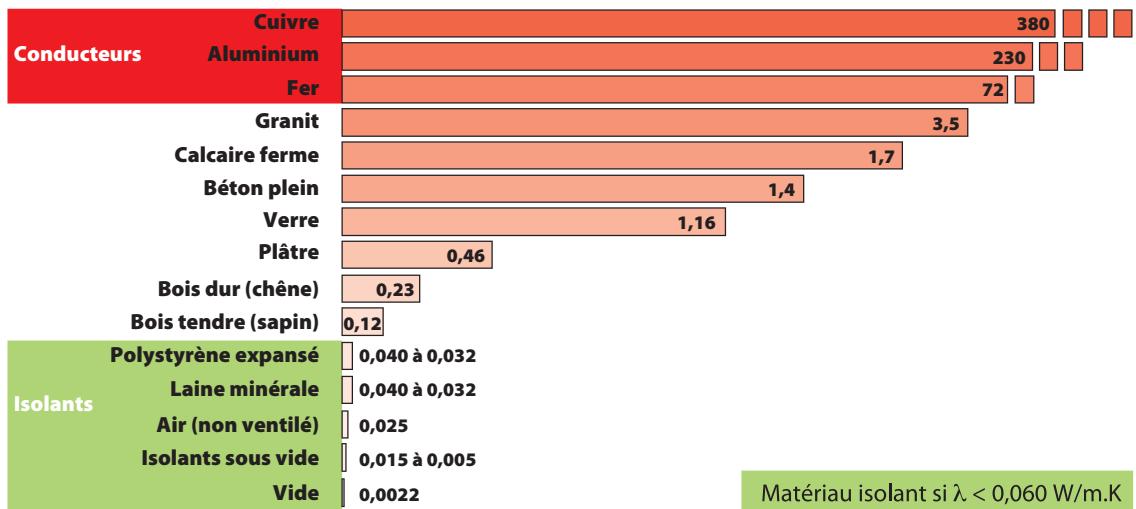


Figure 3 : La conductivité thermique de divers matériaux

La **résistance thermique** d'un matériau est sa capacité à freiner le flux de chaleur qui le traverse. Pour les matériaux homogènes, la résistance thermique est égale au rapport de l'épaisseur du matériau en mètres (e) par sa conductivité thermique λ ($R = e/\lambda$). L'intérêt est que la valeur obtenue dépend de l'épaisseur du matériau, alors que le coefficient λ est toujours exprimé pour une épaisseur fixe d'un mètre. La résistance R s'exprime en $\text{m}^2 \cdot \text{K/W}$. Plus la résistance thermique d'un matériau est élevée, plus le flux de chaleur est diminué. La valeur R doit apparaître sur l'étiquette produit du matériau et être certifiée.

Par exemple, le polystyrène expansé possède un λ de $0,032 \text{ W/m.K}$. Un bloc de polystyrène de 16 cm d'épaisseur a donc un pouvoir isolant ou une résistance thermique de :

$$R = 0,16 \text{ m} / 0,032 = 5 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$$

La valeur R est utile pour connaître l'épaisseur d'isolant souhaitée ou pour connaître l'épaisseur nécessaire pour obtenir une même isolation avec différents matériaux. Par exemple, pour obtenir une valeur $R = 5$ avec du granit, dont le coefficient λ est de $3,5 \text{ W/m.K}$, il faudrait :

$$e = \lambda \times R$$

$$e = 3,5 \times 5 = 17,5$$

La valeur e étant exprimée en mètres, il faut par conséquent 17,5 m de granit pour obtenir une isolation équivalente à 16 cm de polystyrène !

La résistance exprimée par R ne permet cependant pas de connaître la résistance d'une paroi. En effet, nous avons vu que les échanges thermiques ne sont pas les mêmes en surface qu'à l'intérieur d'un matériau. C'est pourquoi, pour déterminer la

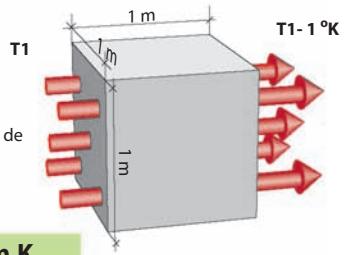
Les performances thermiques des matériaux

Le coefficient de conductivité thermique λ

Le coefficient de conductivité thermique représente le flux de chaleur par mètre carré traversant 1 m de matériau homogène, pour une différence de température de 1 degré entre les deux faces.

Les matériaux isolants sont caractérisés par une conductivité thermique faible.

Ce coefficient n'est jamais égal à 0, il y a toujours un transfert de chaleur.



Coefficient de conductivité thermique : λ (lambda) - exprimé en **W/m.K**

Plus λ est **faible**, plus le matériau est **isolant**.

watt / degré
mètre / Kelvin

La résistance thermique R

Elle caractérise la capacité d'une paroi à s'opposer au passage de chaleur.

Pour les matériaux homogènes, elle est égale au rapport de l'épaisseur du matériau en mètres par sa conductivité thermique.

Résistance thermique : R - exprimé en **m².K/W**

Plus **R** est **important**, plus la paroi est **isolante**.

On peut augmenter **R** en augmentant l'épaisseur du matériau.

$$R = \frac{e}{\lambda}$$

épaisseur en m
en W/m.K

La résistance thermique superficielle R_s

Résistances superficielles (en m ² .K/W)						
Sens du flux	Paroi donnant sur l'extérieur		Paroi donnant sur un local non chauffé			R _{si}
	R _{si}	R _{se}	R _{si} + R _{se}	R _{si}	R _{se}	
Horizontal	0,13	0,04	0,17	0,13	0,13	0,26
Ascendant	0,10	0,04	0,14	0,10	0,10	0,20
Descendant	0,17	0,04	0,21	0,17	0,17	0,34

La résistance thermique superficielle **R_s** représente la résistance au passage de chaleur de l'air. Il existe deux types de résistances superficielles : de l'air intérieur au matériau de construction **R_{si}** et de l'élément de construction à l'air extérieur **R_{se}**. Les valeurs de ces résistances superficielles sont indiquées dans le tableau ci-dessous.

La résistance thermique d'une paroi hétérogène

La résistance thermique de la paroi **R_{totale}** est égale à la somme des résistances thermiques de chaque composant et des résistances superficielles.

$$R_{\text{totale}} = R_{\text{si}} + R_1 + R_2 + R_3 + R_4 + R_{\text{se}}$$



Le coefficient de transmission surfacique U

Le coefficient de transmission surfacique est la quantité de chaleur qui traverse 1 m² de paroi pour une différence de 1 degré entre les ambiances. C'est cette valeur utilisée internationalement que nous utiliserons.

Coefficient de transmission surfacique : U - exprimé en **W/m².K**

Plus **U** est **faible**, plus la paroi est **performante**.

$$U_p = U \text{ paroi}$$

$$U_p = \frac{1}{R_{\text{totale}}}$$

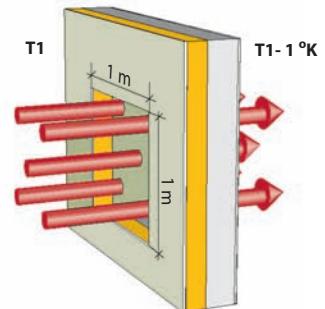


Figure 4 : Les performances thermiques des matériaux

Résistance thermique des lames d'air non ventilées (en $\text{m}^2 \cdot \text{K} / \text{W}$)

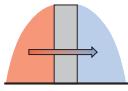
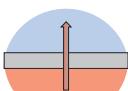
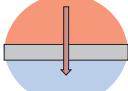
Sens du flux de chaleur	Épaisseur de la lame d'air en mm							
	5	7	10	15	25	50	100	300
 Horizontal	0,11	0,13	0,15	0,17	0,18	0,18	0,18	0,18
 Ascendant	0,11	0,13	0,15	0,16	0,16	0,16	0,16	0,16
 Descendant	0,11	0,13	0,15	0,17	0,19	0,21	0,22	0,23

Figure 5 : La résistance thermique des lames d'air non ventilées

résistance réelle d'une paroi, il faut également prendre en compte sa **résistance thermique superficielle**. Celle-ci est due au barrage rencontré par le flux thermique pour passer de la convection (air) à la conduction (paroi opaque). La résistance opposée au passage du flux thermique de l'air ambiant intérieur à la paroi est notée R_{Si} (résistance superficielle intérieure).

La résistance de la paroi vers l'air extérieur est notée R_{Se} (résistance superficielle extérieure). La résistance superficielle s'exprime, comme R , en $\text{m}^2 \cdot \text{K} / \text{W}$ et varie en fonction du sens du flux thermique (ascendant, descendant ou horizontal). La figure 4, qui récapitule les différents critères de performances thermiques des matériaux,

présente également les valeurs de résistance superficielle définies par la réglementation thermique.

Grâce à toutes ces valeurs, il est possible de calculer la résistance thermique totale d'une paroi composée de plusieurs matériaux, comme c'est souvent le cas dans un bâtiment. Il suffit d'additionner les résistances de chacun des matériaux constituant la paroi et les résistances thermiques superficielles. Par exemple, la résistance totale d'un mur en béton de 14 cm d'épaisseur avec un isolant en laine minérale de 10 cm plus plaque de plâtre est la suivante (en partant de l'intérieur) :

$$R_{\text{totale}} = R_{Si} + R_{\text{plâtre}} + R_{\text{isolant}} + R_{\text{béton}} + R_{Se}$$

$$R_{\text{totale}} = 0,13 + 0,021 + 2,5 + 0,082 + 0,04 = 2,773$$

La résistance R totale de la paroi est de $2,77 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$.

Parfois, une paroi comporte des lames d'air non ventilées. Celles-ci ont une influence directe sur la résistance totale. Dans ce cas, il est normal et même nécessaire de les prendre en compte dans le calcul de la résistance totale. Dans le tableau de la figure 5 sont indiquées les valeurs de R des lames d'air, en fonction du sens du flux thermique, qui peut être horizontal, ascendant ou descendant et selon l'épaisseur de la lame d'air. Celle-ci doit naturellement être parfaitement étanche. Tout mouvement ou courant d'air détériorerait considérablement les valeurs indiquées dans ce tableau et fausserait le résultat final. Par exemple, dans une paroi verticale, une lame d'air immobile de 7 cm offre une résistance thermique de $0,15 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$, ce qui est un complément important pour la performance globale de la paroi.

Le coefficient lambda indique la quantité de chaleur traversant un mètre cube de matériau homogène, ce qui permet de classer, par exemple, les matériaux entre eux. Grâce à ce coefficient, il est également possible de calculer la résistance R totale d'une paroi en fonction de son épaisseur, ou inversement de déterminer l'épaisseur de la paroi désirée en fonction de la résistance à atteindre.

Il serait intéressant de connaître le coefficient lambda des parois pour pouvoir effectuer un classement, notamment, selon les principes constructifs. Un tel classement permet-

trait d'avoir des données chiffrées pour faire son choix, par exemple, entre des constructions en parpaings, en béton, en briques ou en béton cellulaire. Cependant, toutes les parois ne sont pas homogènes et ne font pas un mètre d'épaisseur, c'est même extrêmement rare. Or, nous savons que le coefficient lambda qui permet de classer les matériaux entre eux, exige de telles conditions pour être calculé. Le lambda ne peut pas être donné pour un mur, puisqu'en pratique celui-ci est toujours constitué de divers matériaux de différentes épaisseurs.

C'est pourquoi on a recours à un troisième critère pour définir les performances thermiques dans le bâtiment. C'est un coefficient qui permet d'évaluer la quantité de chaleur traversant une paroi hétérogène, à la manière du coefficient lambda, mais sans ses contraintes. Il s'agit du **coefficient de transmission surfacique U**. Il s'exprime en $\text{W/m}^2 \cdot \text{K}$ et représente la quantité de chaleur traversant un mètre carré de paroi pour une différence de température d'un degré entre les deux faces. U est un coefficient égal au rapport de 1 sur la résistance totale de la paroi ($U = 1/R_{\text{totale}}$). Plus U est faible, moins il y a de déperditions. U est une valeur utilisée internationalement (anciennement appelée K dans certains calculs thermiques).

Par exemple, pour un mur en béton de 14 cm d'épaisseur, la résistance R_{totale} est de $0,25 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$. U est égal à $1/0,25 = 4 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$. Si on considère une différence de température de 10°C entre les deux faces d'un mur

en béton d'une surface de 50 m^2 , les déperditions seront de :

$$4 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K} \times 50 \text{ m}^2 \times 10 \text{ K} = 2000 \text{ W}$$

En ne tenant pas compte des résistances superficielles, la valeur U d'une hypothétique paroi homogène d'un mètre d'épaisseur correspondrait à la valeur du coefficient lambda du matériau de cette paroi.

Le coefficient U est utilisé également pour caractériser les performances des parois vitrées. Dans ce cas, il sera noté U_w (pour *window*, fenêtre en anglais).

En conclusion, il est utile de retenir que le coefficient lambda (λ) est une valeur qui caractérise des matériaux homogènes. On l'utilise notamment pour indiquer les performances des isolants. Plus il est petit, meilleure est le pouvoir isolant. Par exemple, la laine de verre présente un lambda de $0,035 \text{ W/m.K}$ environ.

La résistance R indique la capacité à freiner la chaleur d'un ensemble de matériaux différents, comme dans le cas d'une paroi, en additionnant la résistance de chaque couche de matériau. Plus R est grand, meilleure est l'isolation. Par exemple, un mur composé d'un enduit extérieur de $1,5 \text{ cm}$ d'épaisseur, de parpaings creux de 20 cm , d'un isolant de 8 cm de laine de verre plus 1 cm de plaque de plâtre, offre une résistance totale $R = 2,95 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$.

Le coefficient U est une valeur qui peut s'appliquer à des matériaux hétérogènes, puisqu'il est calculé à partir de R. Il permet de classer non plus des matériaux seuls, mais un ensemble de matériaux, comme une paroi. Plus il est petit, meilleure est l'isolation. Par exemple, le même mur

en parpaings plus isolant de 8 cm de laine de verre plus 1 cm de plaque de plâtre, présente un coefficient U = $0,34 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$.

Les échanges gazeux

Comme pour les flux thermiques, des échanges gazeux s'opèrent entre l'intérieur et l'extérieur d'une habitation. Certains effets sont recherchés, d'autres sont à proscrire au risque d'augmenter la pollution intérieure, d'engendrer des condensations et tous les désagréments qui en découlent (moisisures, insalubrité). Pour qu'une isolation soit efficace et, par conséquent, permette une faible consommation d'énergie, il faut également maîtriser les échanges d'air entre l'intérieur et l'extérieur.

La vapeur d'eau

Nous avons vu qu'un matériau hydrophile mouillé perdait en grande partie sa capacité d'isolation. L'eau étant conductrice thermiquement, l'humidité est un paramètre important à prendre en compte.

L'eau extérieure (pluie, neige, ruissellement) doit être totalement arrêtée par l'enveloppe du bâtiment, c'est-à-dire la façade, les menuiseries et le toit. En hiver, l'air intérieur est plus chaud et humide qu'à l'extérieur, ce qui entraîne un flux gazeux de vapeur qui tend à s'échapper par les parois, vers l'extérieur. La vapeur d'eau transite majoritairement par convection, c'est-à-dire avec les flux d'air. Elle transite aussi par diffusion à

travers les parois. En été, la migration est inversée, de l'extérieur vers l'intérieur de l'habitation. Si la vapeur d'eau entre en contact avec un élément froid, il se produit une condensation, qui, au fil du temps, provoque des moisissures. Ce phénomène se produit dans une habitation non isolée et mal ventilée et sur les menuiseries classiques non isolantes. Le problème peut également se produire dans les habitations mal isolées, avec des ponts thermiques (voir page 57) ou avec une mauvaise étanchéité à l'air et à la vapeur d'eau.

La figure 6 présente le diagramme de Mollier qui permet de calculer le point de condensation selon la température et le taux d'hygrométrie relative. Pour ce faire, notez la température intérieure et le taux d'hygrométrie ambiant. Placez un point à l'intersection de la courbe d'humidité relative et de la température. Projetez horizontalement ce point jusqu'à la courbe de saturation. La température du point de rosée est lisible à l'intersection avec l'abscisse en bas du diagramme.

Dans une pièce mal ventilée, le taux d'humidité peut rapidement atteindre des niveaux élevés et provoquer de la condensation sur les parois, même s'il ne semble pas faire froid à l'extérieur.

Il est indispensable d'évacuer l'excédent d'humidité produit dans l'habitation. L'excès doit être ponctuel et aisément évacué par un système de ventilation performant. Une ventilation légère mais constante est préférable à une évacuation puissante mais de courte durée.

La condensation est aisément repérable en surface. Malheureusement, elle peut aussi se produire à l'intérieur des parois et provoquer des dégradations. En effet, en fonction de la perméabilité des matériaux et de la différence de pression de vapeur entre l'intérieur et l'extérieur, une plus ou moins grande quantité d'eau passe à travers les parois. Si elle reste à l'état gazeux, cela ne pose pas de problème. Si elle rencontre une zone froide, elle passe à l'état liquide, c'est la condensation interne.

La solution la plus efficace est de faciliter le transfert naturel de la vapeur d'eau. Les couches successives de matériaux constituant la paroi doivent être de plus en plus perméables à la vapeur d'eau, de l'intérieur vers l'extérieur. C'est généralement le cas avec une isolation thermique par l'extérieur ou dans une construction à isolation répartie. Dans ces cas, la paroi est dite ouverte à la diffusion de vapeur d'eau ou perspirante. Cependant, cela n'exclut pas le recours à un système de ventilation performant et permanent pour éliminer les surplus ponctuels de vapeur d'eau. Plusieurs valeurs permettent de définir le comportement des matériaux au transfert de vapeur d'eau et de quantifier les flux entre deux ambiances : la perméabilité, la perméance et la résistance à la diffusion de vapeur d'eau.

La perméabilité à la vapeur d'eau « w » s'exprime en g/m.h.mm Hg. Elle représente la quantité d'humidité traversant un mètre d'épaisseur de matériau par heure pour une différence de pression d'un millimètre de mercure entre les deux faces. Plus cette valeur est faible,

Condensation à la surface d'une paroi

Exemple d'un balcon avec isolation par l'extérieur

Le pont thermique n'est pas traité dans la pièce inférieure. La température de surface au point le plus défavorable atteint 13 °C.

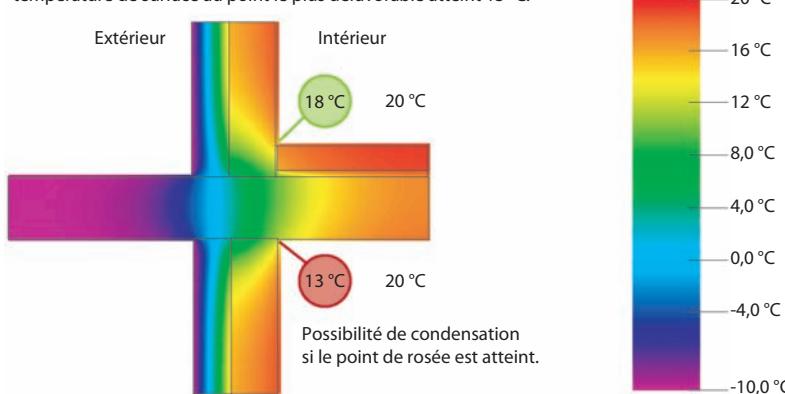
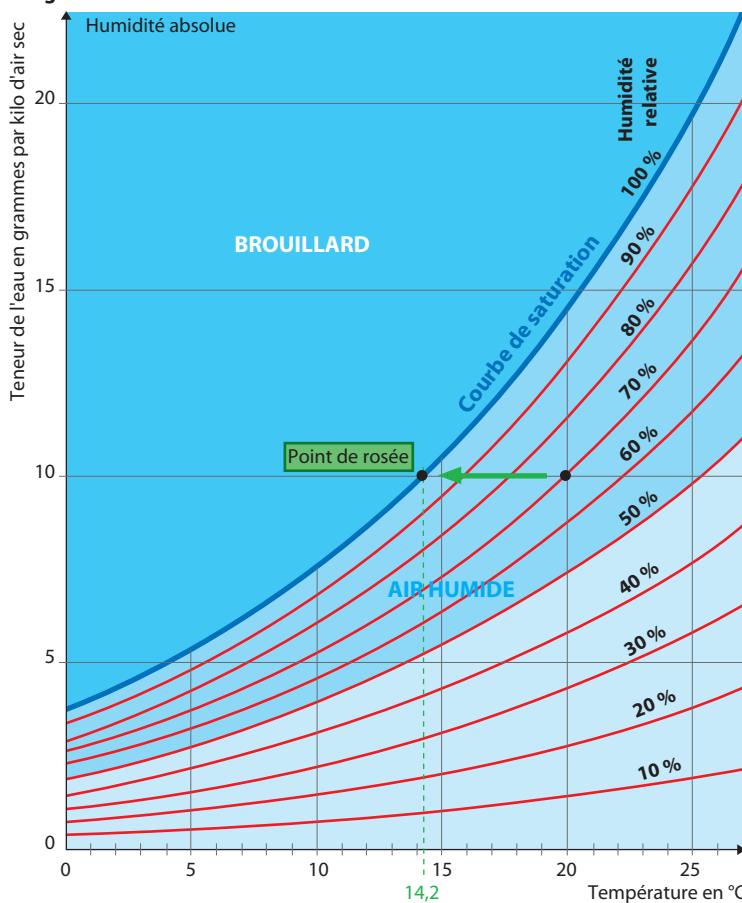


Diagramme de Mollier



Pour connaître la température du point de rosée, placez un point à l'intersection de la courbe d'humidité relative et de la température intérieure.

Reportez horizontalement le point sur la courbe de saturation et lisez la température correspondante.

Exemple :

20 °C à 70 % d'humidité = point de rosée à 14,2 °C.

Figure 6 : La condensation à la surface d'une paroi

moins le matériau laisse transiter la vapeur d'eau. Le béton, par exemple, présente une perméabilité de 0,01 à 0,002, la brique creuse de 0,015, le plâtre de 0,01, le contreplaqué de 0,0007, une laine minérale nue de 0,05 à 0,07 et un polystyrène expansé, de 0,0018 à 0,0045 g/m.h.mm Hg.

La **perméance** (P) permet d'évaluer le niveau de perméabilité à la vapeur d'eau d'un matériau homogène pour une épaisseur donnée. On la détermine à partir de la perméabilité $P = \varpi / \text{épaisseur}$ en mètres du matériau. Elle caractérise la quantité de vapeur d'eau traversant un mètre carré de matériau en une heure pour une différence de pression d'un millimètre cube de mercure entre les deux faces. P s'exprime en g/m².h.mm Hg.

Enfin, la résistance à la diffusion de vapeur d'eau représente la capacité d'un matériau à résister à la diffusion de vapeur d'eau. Il existe plusieurs valeurs pour exprimer cette capacité. La plus simple et la plus utilisée en Europe utilise le coefficient de résistance à la diffusion de vapeur d'eau « μ » (mu), dont la valeur est basée sur la perméabilité à la vapeur d'eau de l'air ϖ , soit 1. Elle est établie par la formule suivante : $\mu = \varpi_{\text{air}} / \varpi_{\text{matériau}}$, soit $1 / \varpi_{\text{matériau}}$. Mu est une unité sans dimension.

La résistance à la diffusion de vapeur d'eau d'un matériau s'exprime en mètres et indique l'épaisseur de lame d'air équivalente. Elle peut se caractériser par Sd ou μd . On l'obtient par le produit de μ par l'épaisseur du matériau en mètres ($Sd = \mu \times e$).

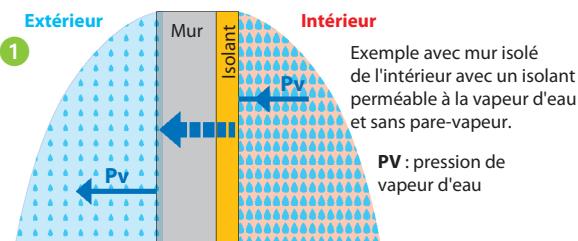
Par exemple, une plaque de plâtre a un coefficient μ de 8. Sa résistance à la diffusion de vapeur d'eau Sd est donc de $8 \times 0,0125$ (12,5 mm) = 0,1 m. Plus la valeur Sd est élevée, plus le matériau est étanche à la vapeur. Une lame d'air de 1 m présente donc une résistance à la diffusion de vapeur d'eau de 1 m. Un enduit chaux-plâtre a une valeur Sd de 0,15 m (pour 15 mm d'épaisseur), un panneau de fibres de bois de 10 cm, présente une valeur de 0,5 m, une laine minérale de 10 cm, une valeur de 0,1 m, du polystyrène expansé en panneaux de 10 cm, une valeur de 6 m. En revanche, une bande de bitume de 4 mm d'épaisseur et d'un coefficient μ de 60 000, présente une valeur Sd de 240 m.

La très faible résistance au transfert de vapeur d'eau des isolants fibreux pose problème en cas d'isolation thermique par l'intérieur. En effet, ce type d'isolant est absorbant et offre peu de résistance à l'eau à l'état gazeux. On obtient donc une zone très perméable à la vapeur dès le début de son cheminement dans la paroi. La liaison entre l'isolant et la paroi dure présente un risque élevé de condensation. En d'autres termes, de l'intérieur vers l'extérieur, la température et la pression de saturation chutent rapidement dans l'isolant alors que la pression de vapeur reste importante, d'où un dépassement possible du point de saturation et l'apparition de condensations internes (figure 7).

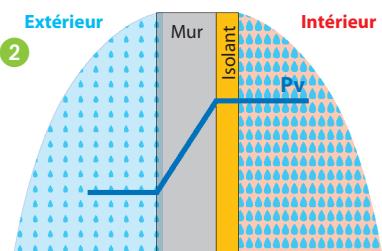
Pour remédier à ce problème, il est nécessaire de placer un pare-vapeur du côté chaud de l'isolant (côté intérieur). Son but est de faire chuter

Condensation dans les parois

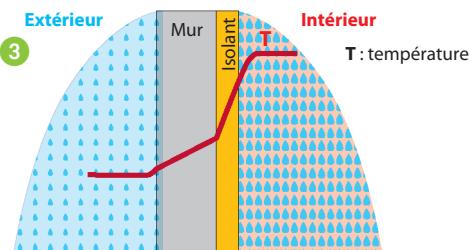
Formation de condensation interne par diffusion de vapeur



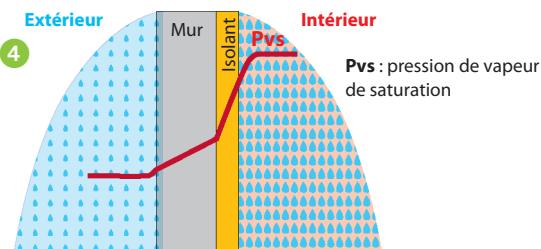
En hiver, la pression de vapeur d'eau de l'air chaud à l'intérieur est supérieure à celle de l'air froid extérieur. Il y a donc transfert de vapeur à travers la paroi de l'intérieur vers l'extérieur, comme pour le flux de chaleur.



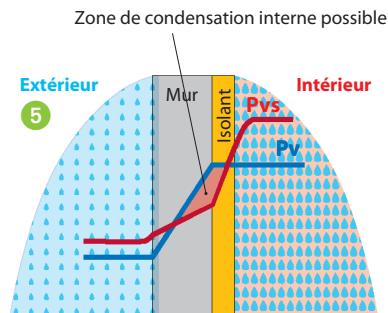
La paroi étant constituée de plusieurs éléments, une chute de pression se produit dans chaque couche de matériau en fonction de sa résistance à la diffusion de vapeur.



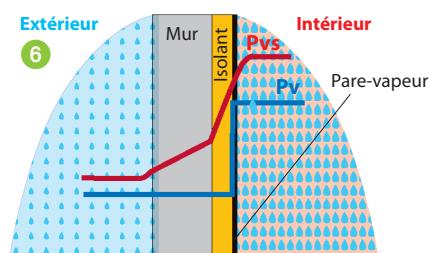
Le flux thermique occasionne une baisse de température dans les différentes couches de matériaux, d'autant plus importante que leur résistance thermique est élevée.



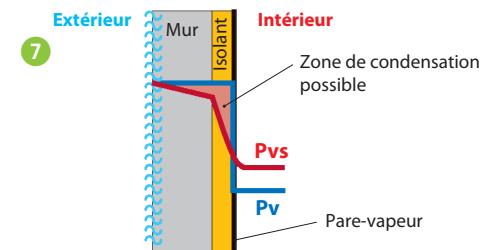
La baisse de température à l'intérieur des divers composants du mur permet de déterminer une courbe de la pression de vapeur de saturation.



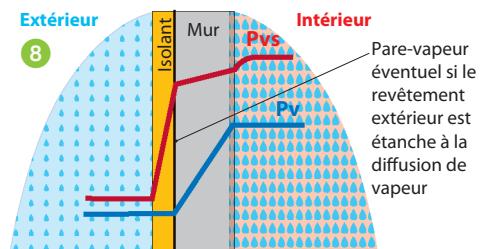
La condensation interne peut se produire dans une couche de matériau si la pression de vapeur réelle devient égale ou supérieure à la pression de vapeur de saturation.



Avec un pare-vapeur posé côté chauffé, la pression de vapeur réelle devient inférieure à la pression de vapeur de saturation, ce qui évite tout risque de condensation.



En été, si un mur extérieur est mal protégé de l'humidité, son assèchement peut se faire du côté intérieur et provoquer un risque de condensation à la liaison isolant/pare-vapeur.



Un mur isolé par l'extérieur ne présente pas de risques de condensation si toutefois la migration de vapeur peut se faire normalement de l'intérieur vers l'extérieur.

Figure 7 : La condensation dans les parois

la pression de vapeur d'eau avant son passage dans l'isolant. La pose doit être minutieuse, car le moindre défaut de continuité peut provoquer un pont de vapeur et une zone de condensation interne. Elle peut apparaître sur la face intérieure du mur, voire dans l'isolant.

Dans le cas d'un isolant non perméable à la vapeur d'eau, par exemple du polystyrène, il n'est pas nécessaire de poser un pare-vapeur, à condition que l'air ne puisse pas circuler entre l'isolant et la paroi, ce qui est difficile à réaliser, ni transiter entre les panneaux. En effet, une condensation interne peut également se produire par convection. L'air intérieur chaud et humide pénétrant derrière l'isolant peut condenser au contact de la paroi froide. La pose de l'isolant doit donc, dans ce cas aussi, être réalisée avec soin, notamment à tous les points singuliers (percements, boîtes d'encastrement électriques, jonctions au sol ou entre les panneaux d'isolant).

La maîtrise du transfert de la vapeur d'eau à travers les parois est un paramètre primordial à prendre en compte lorsqu'on souhaite réaliser l'isolation thermique par l'intérieur des murs extérieurs lourds. Cela est vrai également pour les combles aménagés et les constructions à ossature bois.

En hiver, la vapeur transite de l'intérieur vers l'extérieur et condense donc à sa sortie de l'isolant. Même si la toiture est correctement ventilée, l'air froid ne pouvant pas absorber une grande quantité de vapeur d'eau, il y a condensation, voire formation de givre ou de glace directement sur l'isolant. Il risque de perdre ses performances,

de s'humidifier et d'entraîner, à plus ou moins long terme, la dégradation des bois de charpente.

Dans la plupart des cas, il est donc indispensable de freiner la vapeur d'eau qui transite dans ces parois. Si vous réalisez une parfaite étanchéité à l'air à l'intérieur des combles, avec des plaques de plâtre parfaitement jointoyées, par exemple, le transfert de vapeur d'eau par convection est diminué. Cependant, le transfert par diffusion persiste, surtout à travers le plâtre. Par exemple, avec un matériau ayant une faible résistance à la diffusion de vapeur d'eau, soit moins de 0,25 m, le transfert de vapeur par diffusion peut atteindre $2,2 \text{ g/h/m}^2$. Il est par conséquent indispensable de poser un pare-vapeur continu avant l'isolant.

Il est important de savoir que le papier kraft intégré aux isolants est censé jouer le rôle de pare-vapeur (avec une valeur $Sd = 3 \text{ m}$, pour une épaisseur inférieure à 1 mm). Cependant, il est difficile de le rendre parfaitement continu, à cause des nombreux déchirements et percements dus aux éléments de l'ossature, aux passages de gaines, aux joints au niveau du sol, etc. C'est d'ailleurs pourquoi ce type de pare-vapeur n'est plus admis dans les constructions à ossature bois et dans les combles.

Un pare-vapeur indépendant et continu est nécessaire. Il peut s'agir de film de polyéthylène, de polypropylène, de PVC...

Les pare-vapeur sont classés en quatre familles selon leur résistance à la diffusion de la vapeur d'eau :

- E1 pour les pare-vapeur d'un Sd

compris entre 2 et 5 m (film PE inférieur à 0,1 mm ou film PVC inférieur à 1 mm) ;

- E2 pour les pare-vapeur d'un Sd compris entre 5 et 25 m (film PE supérieur à 0,1 mm ou film PVC supérieur à 1 mm) ;

- E3 pour les pare-vapeur d'un Sd compris entre 25 et 200 m (bitume armé ou polymère) ;

- E4 pour les pare-vapeur d'un Sd supérieur à 200 m (bitume armé d'une feuille métallique, systèmes bitumeux multicouches).

Les pare-vapeur hygrorégulants, aussi appelés freine-vapeur, représentent les produits les plus performants actuellement. Ils sont parfaitement indiqués dans les combles aménagés, les structures à ossature bois et pour les murs lourds avec isolation par l'intérieur. Dans les combles habitables, on les associe généralement avec un écran sous toiture étanche à l'eau mais perspirant. La résistance à la diffusion de vapeur d'eau des pare-vapeur hygrorégulants est variable selon les saisons. Ils permettent de réguler efficacement le transfert de vapeur d'eau dans toutes les conditions et de laisser respirer la paroi ou la toiture, en minimisant les risques de condensation interne. Ils permettent également d'assurer la fonction d'étanchéité à l'air lorsque tous les points singuliers sont traités.

Un autre facteur à prendre en compte est la ventilation de l'habitation. Si elle est permanente et performante, elle permet d'évacuer la majeure partie de la vapeur d'eau et de minimiser les transferts à travers les parois en contact avec l'extérieur.

Les normes françaises définissent le classement des locaux selon la quantité de vapeur d'eau produite et la performance de la ventilation. Ce classement est défini par le rapport de la quantité de vapeur d'eau produite à l'intérieur (W en grammes par heure) par le taux de renouvellement d'air (n en mètres cubes par heure). Le résultat est une valeur en grammes par mètre cube. Le classement répertorie quatre types de locaux :

- les locaux à faible hygrométrie (W/n inférieur ou égal à 2,5 g/m³) qui correspondent à des immeubles de bureaux sans climatisation ou à des habitations équipés d'une VMC ou de systèmes propres à évacuer les condensations dès qu'elles se produisent (hotte, extracteur...) ;

- les locaux à hygrométrie moyenne (W/n compris entre 2,5 et 5 g/m³), qui caractérise les locaux d'habitation correctement chauffés et ventilés (y compris les salles d'eau et les cuisines), sans suroccupation ;

- les locaux à forte hygrométrie (W/n compris entre 5 et 7,5 g/m³) sont des locaux d'habitation mal ventilés ou suroccupés ;

- les locaux à très forte hygrométrie (W/n supérieur à 5 g/m³), ne concernent pas les locaux d'habitation (salles d'eau collectives, piscines couvertes, etc.).

On constate que, selon son système de ventilation, un logement peut être classé de faible à forte hygrométrie. Cela a pour conséquence que l'on devra utiliser des pare-vapeur plus performants et parfaitement étanchés pour freiner le plus possible la migration de vapeur dans les parois. La plupart des solutions d'isolation sont

prévues pour des locaux à faible ou moyenne hygrométrie, ce qui n'est pas le cas d'un logement ancien mal ventilé, par exemple.

Dans le cas d'une isolation par l'extérieur, la pression de vapeur chute rapidement dans la paroi et arrive à un niveau bas à son entrée dans l'isolant. Le risque de condensation interne est donc limité. Le revêtement extérieur doit tout de même être perméable à la vapeur et étanche au ruissellement. Si le revêtement extérieur choisi est imperméable à la vapeur, il faut alors placer un pare-vapeur entre l'isolant et le mur ou créer une lame d'air ventilée entre l'isolant et la finition extérieure.

L'étanchéité à l'air

Comme pour la vapeur, des différences de pression existent, dues au vent ou aux différences de température. Il convient donc de limiter les passages de l'air, présents dans l'ensemble de l'enveloppe d'un bâtiment, par exemple aux liaisons entre murs et toiture, murs et menuiseries, points de passage des canalisations ou fissures dans le gros œuvre (figure 8). Les fuites au niveau des menuiseries sont les plus importantes (plus de 40 %). Étonnamment, l'autre grande source de fuites d'air dans une maison, soit près de 40 % également, est constituée par les équipements électriques (boîtes d'encastrement). Ce point est rarement pris en compte alors qu'il est très important et qu'il ne nécessite pas une grande technicité pour être traité mais plutôt de la minutie et des matériaux adaptés (boîtes d'encastrement étanches).

L'isolation doit par conséquent être parfaitement réalisée pour éviter les fuites d'air chaud. Cela implique que les éléments d'isolant soient parfaitement jointifs entre eux et avec les structures. Il en va de même pour les pare-vapeur, puisqu'ils participent également à l'étanchéité à l'air et pour les passages des canalisations d'eau ou autres.

De ce fait, une habitation correctement isolée n'a pas de fuites d'air. C'est pourquoi il faut prévoir une ventilation mécanique adaptée pour renouveler l'air intérieur de façon régulière et suffisante. La simple ouverture des fenêtres pendant quelques minutes chaque jour ne suffit pas. La pollution intérieure et les odeurs augmenteraient trop rapidement.

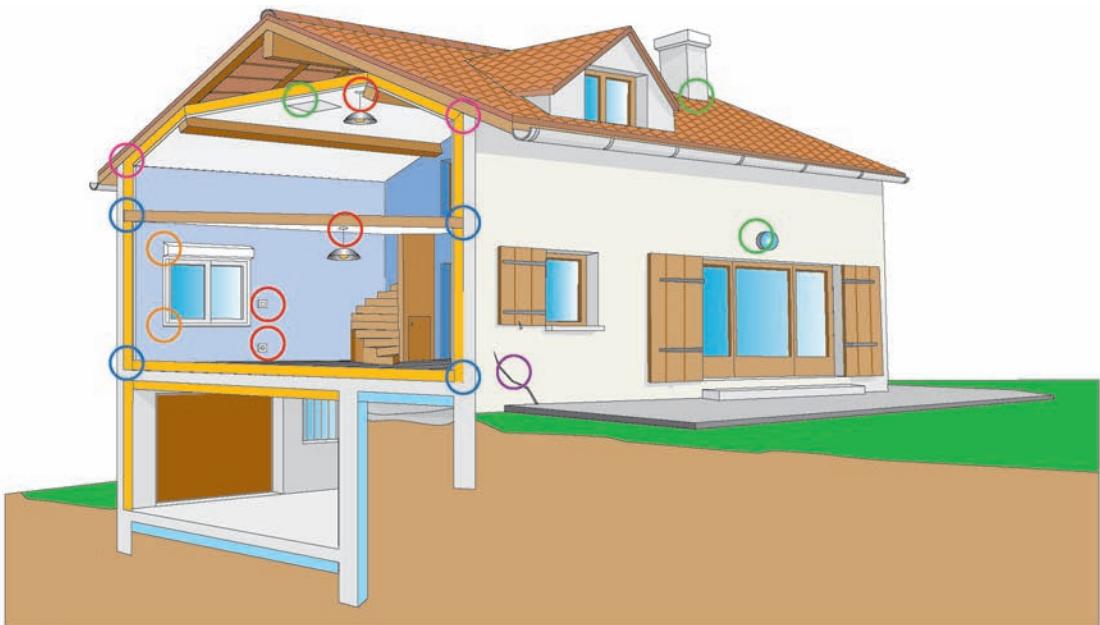
L'étanchéité à l'air et à la vapeur d'eau sont deux phénomènes différents mais liés. C'est pourquoi, un pare-vapeur rapporté est une bonne solution, puisqu'il permet de maîtriser les deux.

À l'instar des ponts thermiques, où de l'étanchéité d'une piscine, il suffit d'une petite fente, par exemple entre des plaques de plâtre, pour créer d'importants désagréments et des pertes d'énergie inutiles. Un interstice de 1 mm entre des plaques de plâtre peut laisser pénétrer, par convection, 800 g/m² d'humidité durant une journée d'hiver, alors qu'un pare-vapeur hygrorégulant rapporté, ne laissera pénétrer que 5 g (source Pro Clima).

En ce qui concerne les pertes d'énergie, les conséquences sont également non négligeables. D'après une étude de l'Institut de physique du bâtiment de Stuttgart, une maison de 80 m² qui

Étanchéité à l'air

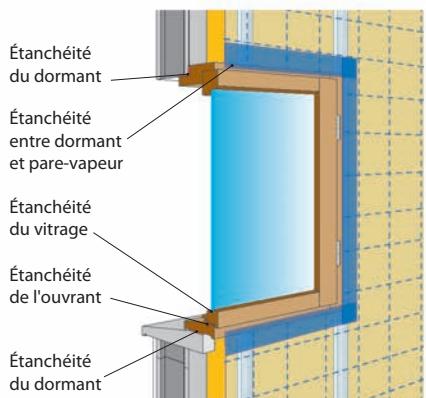
Les points de passage de l'air



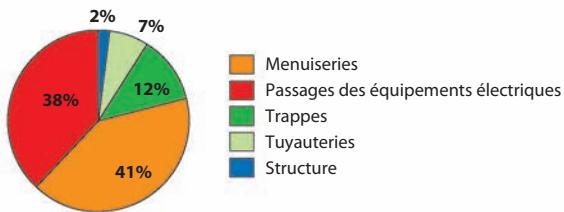
○ Liaisons façade/plancher
○ Liaisons façade/toiture
○ Menuiseries extérieures

○ Trappes et éléments traversant les parois
○ Équipements électriques
○ Fissures dans le gros œuvre

Menuiseries

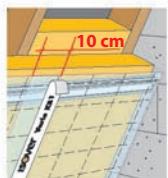


Fuites récurrentes

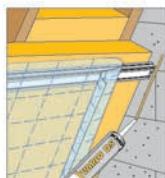


En isolation par l'intérieur (Source Isover)

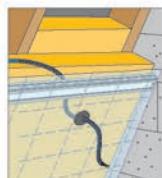
Utilisez un pare-vapeur continu, rapporté, hygro-régulant ou traditionnel. Les raccords entre les lés et entre le pare-vapeur et la maçonnerie sont étanchéifiés par un adhésif. Traitez impérativement tous les points singuliers.



Raccords entre les lés



Raccords avec la maçonnerie



Utilisation d'un œillet adhésif sur un conduit électrique



Utilisation de ruban adhésif sur divers conduits

Figure 8 : L'étanchéité à l'air

présente des fuites d'air nécessite une quantité d'énergie de chauffage aussi importante qu'une habitation de 400 m² avec une étanchéité à l'air parfaite.

Si l'utilisation d'un pare-vapeur rapporté est obligatoire pour une maison à ossature bois et dans les combles, elle est fortement recommandée en isolation par l'intérieur, pour les parois verticales.

En fonction de la technique constructive ou d'isolation choisie, l'étanchéité à l'air peut s'effectuer par l'intérieur ou par l'extérieur. La figure 9 présente des solutions adaptées aux maisons à ossature bois. Ces règles valent également parfaitement pour les constructions en dur isolées par l'intérieur.

En France, l'étanchéité à l'air et à la vapeur d'eau sont rarement des aspects pris en compte et traités avec rigueur. C'est pourtant fondamental si l'on souhaite réaliser des bâtiments à très faible consommation d'énergie. Rappelons que le standard des constructions Passivhaus ou Minergie P (voir page 46) doit être une perméabilité à l'air inférieure à $n_{50} = 0,6 \text{ h}^{-1}$. C'est-à-dire que pour une différence de pression entre l'intérieur et l'extérieur de 50 Pa, le taux de renouvellement d'air, dû à la perméabilité de la construction, doit être inférieur à 0,6 volume de l'habitation en mètres cubes par heure. Ce niveau de performance est environ cinq fois supérieur à la valeur de référence de la RT 2005 concernant les maisons individuelles ($n_{50} = 3,1 \text{ h}^{-1}$).

Lors des mesures effectuées pour les maisons passives, il est courant d'atteindre des valeurs de $n_{50} = 0,2 \text{ h}^{-1}$.

L'impact sur la consommation d'énergie est estimé entre 2 et 5 kWh/m²/an par unité de n_{50} .

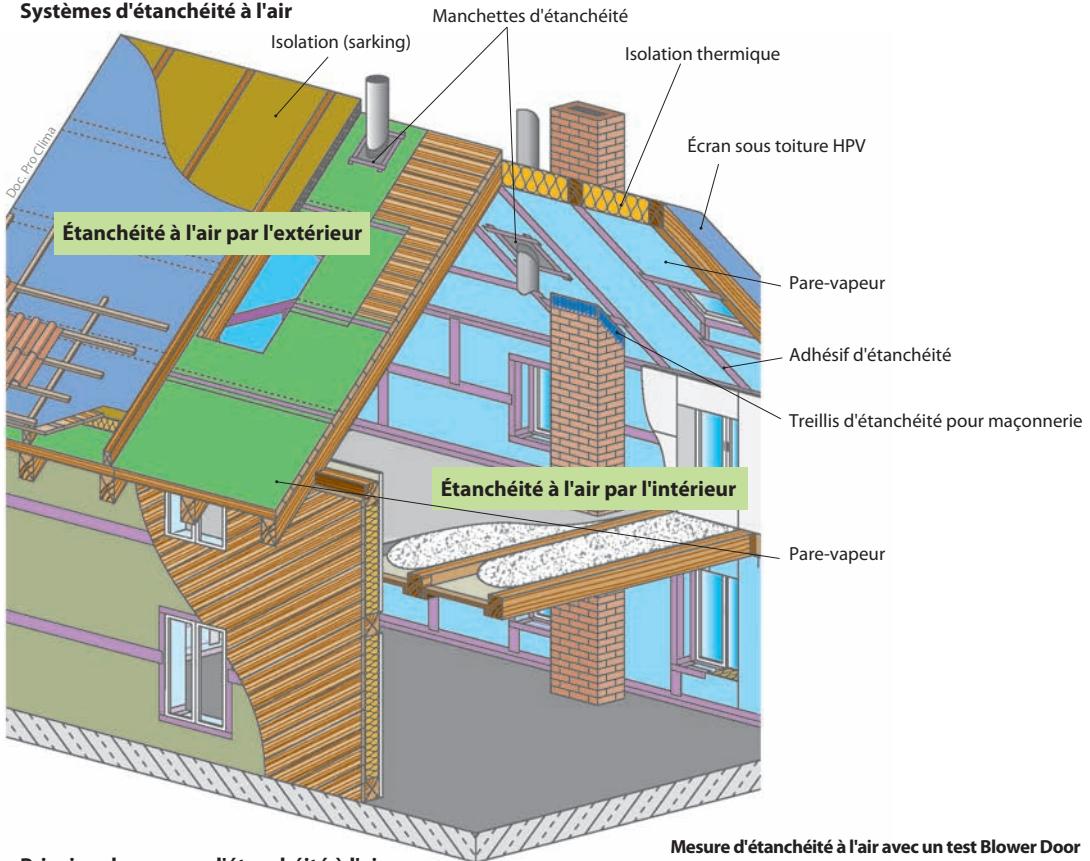
Naturellement, pour respecter les réglementations thermiques et les labels, il faut mesurer l'étanchéité à l'air de façon précise. Le procédé internationalement reconnu est le test *blower door*. Il s'agit d'une mesure de pression différentielle, qui nécessite un appareil spécifique doté d'une soufflerie (*blower*) installé de manière étanche sur la porte d'entrée (*door*). En appartement collectif, cette installation peut être réalisée sur une fenêtre.

On calcule le volume d'air total contenu à l'intérieur de l'habitation. Le test du *blower door* permet de mesurer le volume d'air aspiré ou expulsé, en mètres cubes par heure, dus aux défauts d'étanchéité de la construction. Les mesures sont exécutées sous différentes variables. L'appareil crée des surpressions et des dépressions intérieures afin de détecter tous les types de fuites. Le coefficient n_{50} s'obtient en divisant le volume d'air mesuré par le *blower door*, sous une différence de pression de 50 Pa, par le volume total de l'habitation.

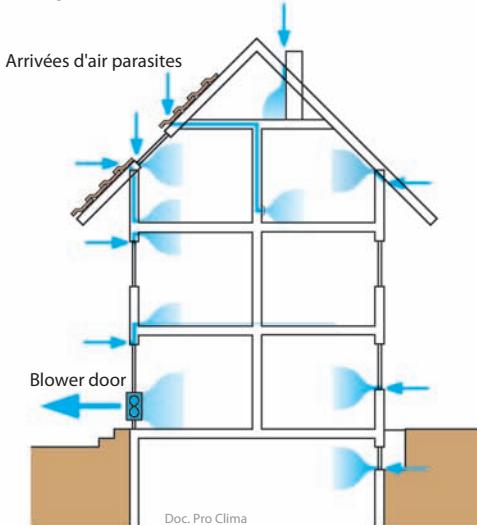
Cette machine permet également de visualiser les fuites. Pour cela, on place l'habitation en surpression et l'on diffuse un brouillard artificiel. Les endroits par lesquels s'échappe le brouillard vers l'extérieur sont des défauts d'étanchéité à l'air. Il est également possible de détecter les défauts d'étanchéité grâce à la thermographie. Ce test doit s'effectuer de préférence en hiver lorsque la différence de

Étanchéité à l'air d'une construction

Systèmes d'étanchéité à l'air



Principe de mesure d'étanchéité à l'air



Mesure d'étanchéité à l'air avec un test Blower Door



Figure 9 : L'étanchéité à l'air d'une construction

température entre l'intérieur et l'extérieur est comprise entre 15 et 20 °C. On crée une surpression dans l'habitation, grâce au *blower door*, pendant une quinzaine de minutes. L'air chaud intérieur s'échappe alors à travers les passages dus aux défauts d'étanchéité en réchauffant les éléments de construction environnants. Une caméra thermographique pourra alors aisément les détecter.

Le test inverse est également possible, en créant une dépression à l'intérieur pour aspirer l'air froid. La détection se fera de la même manière, mais de l'intérieur.

Ce type de tests reste néanmoins assez onéreux.

contrôlée optimise le renouvellement d'air avec le moins de déperditions possible. Dans ce cas, les pertes de chaleur sont de 10 % par le toit, 20 % par les murs, 20 % par le sol, 15 % par les parois vitrées et 20 % par les ponts thermiques (selon les critères de la RT 2005).

Si les ponts thermiques sont minimes dans un bâtiment non isolé, puisque la chaleur passe partout, ils constituent un nouveau problème à combattre en matière d'isolation. Ils se produisent généralement aux points singuliers de la construction et aux endroits où il y a discontinuité de l'isolation. La nature des ponts thermiques et leur traitement sont présentés plus en détail à la page 57.

Par la réduction des déperditions, l'isolation améliore le confort intérieur pour les occupants, notamment en supprimant la sensation de parois froides en hiver. En effet, même si la température affichée par le thermomètre est suffisante, la proximité d'une paroi froide donne l'impression que c'est la température ambiante qui est basse, ce qui incite les occupants à augmenter la température sur le thermostat. Afin d'éviter cette sensation d'inconfort, la différence de température ne doit pas excéder 8 °C entre les parois vitrées et l'air ambiant. Pour les parois opaques, la différence ne doit pas excéder 5 °C. Pour éliminer l'effet de paroi froide, il est plus économique d'isoler les parois concernées plutôt que d'augmenter le chauffage. De même, un sol froid crée une forte sensation d'inconfort pour les habitants. Il doit toujours avoir une température supérieure à 17 °C.

Les déperditions thermiques

En fonction des caractéristiques des matériaux, de la structure et de l'enveloppe d'un bâtiment, il se produit en permanence des déperditions thermiques (figure 10). Comme nous l'avons vu, elles sont de deux natures : par transmission ou par ventilation et perméabilité à l'air.

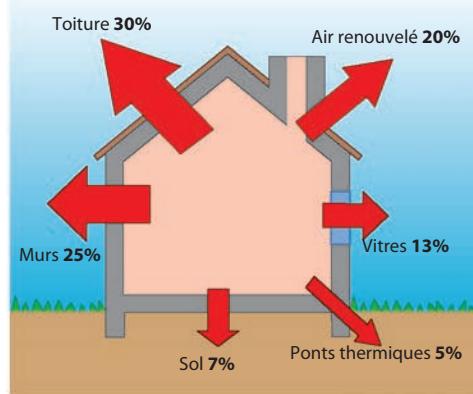
Dans une habitation non isolée, les déperditions thermiques sont maximales en hiver, au niveau des parois opaques et vitrées. La ventilation naturelle et non contrôlée augmente encore les pertes. Environ 30 % de la chaleur s'échappe par le toit, 25 % par les murs, 13 % par les parois vitrées, 7 % par le sol et 5 % par les ponts thermiques. En été, le soleil surchauffe l'ambiance intérieure.

Dans une maison correctement isolée, les flux de chaleur sont réduits sur l'ensemble des parois. La ventilation

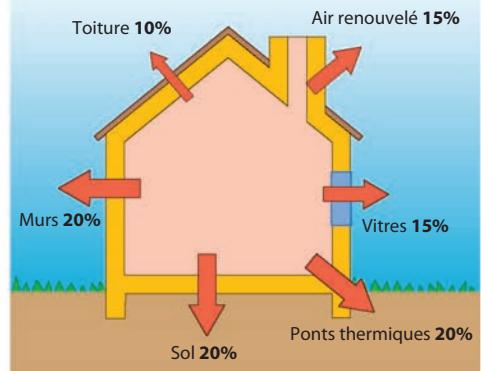
Déperditions thermiques

Déperditions dans une maison individuelle

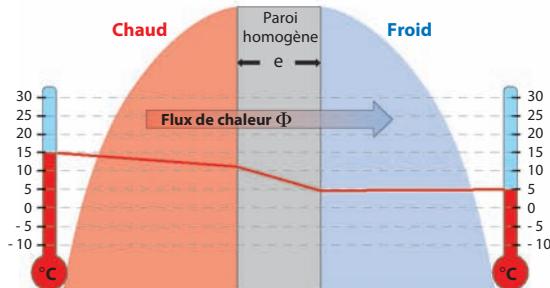
Maison non isolée



Maison isolée selon la RT 2005



Fuites de chaleur et flux de chaleur



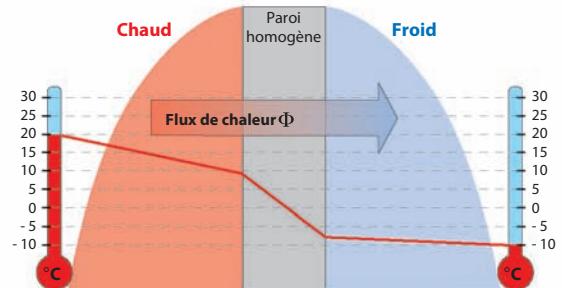
$$\text{Flux de chaleur } \Phi = \lambda \times \frac{\Delta t}{e} \text{ (paroi homogène)}$$

Φ Flux de chaleur en W/m^2

λ Conductivité thermique de la paroi en W/m.K

Δt Différence de température de part et d'autre de la paroi en $^{\circ}\text{C}$

e Épaisseur de la paroi en m



Exemple avec un mur en béton de 0,20 m d'épaisseur ($\lambda = 0,92$).

Température intérieure : 20 $^{\circ}\text{C}$, température extérieure : -10 $^{\circ}\text{C}$.

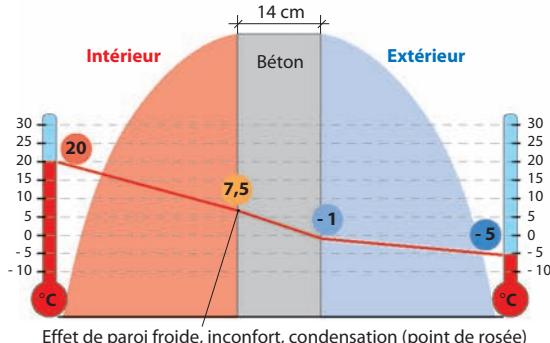
$$\Delta t = 20 - (-10) = 30 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$\text{Flux thermique } \Phi = 0,92 \times 30 / 0,20 = 138 \text{ W/m}^2$$

Le flux thermique dépend de la conductivité thermique du matériau, de son épaisseur et de l'écart de température.

Évolution de la température dans les parois

Paroi non isolée



Paroi isolée par l'intérieur

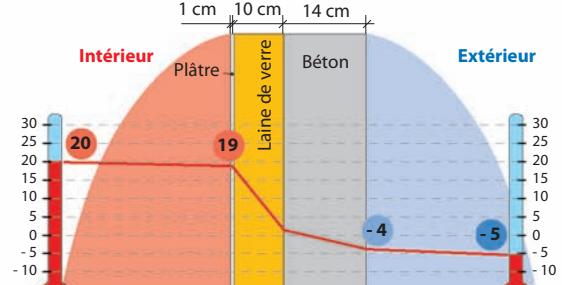


Figure 10 : Les déperditions thermiques

L'inertie thermique

L'inertie thermique est la capacité d'un matériau à emmagasiner et à restituer de la chaleur ou de la fraîcheur. Lorsqu'il s'agit d'isolation, l'inertie thermique peut être l'alliée ou l'ennemie du confort et de la consommation d'énergie. Les performances thermiques globales de l'habitation seront effectivement largement influencées par cette capacité de stockage de la chaleur et par la façon dont vous en tenez compte au moment de la conception. L'inertie thermique peut s'avérer une alliée pour augmenter le confort en hiver ou en été et pour diminuer la part d'énergie consacrée au chauffage ou à l'isolation. Si, au contraire, elle est ignorée ou mal maîtrisée, elle peut se révéler un ennemi de la facture énergétique en vous procurant des conditions d'habitation dégradées. Tout en consommant beaucoup d'énergie, vous risquez d'avoir froid en hiver et chaud en été.

Il est par conséquent important de bien considérer les différentes solutions possibles, surtout dans un projet de construction neuve. Si vous rénovez, il y a aussi des règles que vous pouvez adopter pour mettre de votre côté les bienfaits de l'inertie thermique.

Le principe de l'inertie thermique

Avant toute chose, il est important de connaître les principes caractérisant l'inertie thermique. Selon l'effet recherché, plusieurs propriétés physiques des corps entrent en jeu. La

première d'entre elles est la **capacité thermique**. Il s'agit de la quantité de chaleur potentielle que peut absorber un matériau en fonction de sa masse ou de son volume. Généralement, plus le matériau est lourd, plus sa capacité thermique volumique est grande. Par exemple, le béton et la pierre sont des matériaux présentant une masse volumique élevée. Ils ont également une forte capacité à emmagasiner de la chaleur. Les matériaux ne sont pas tous égaux de ce point de vue, comme le montre la figure 11.

Connaître la capacité thermique d'un matériau n'est pas le seul critère. En effet, il est intéressant de savoir également comment la chaleur est stockée et à quelle vitesse. C'est pourquoi, pour définir l'inertie thermique, on tient compte d'une autre propriété physique qui est l'**effusivité**. C'est la vitesse à laquelle varie la température de surface d'un matériau. Plus cette valeur est grande pour une paroi, plus elle se réchauffe ou se refroidit rapidement. Par exemple, en hiver, cela peut entraîner la sensation de mur froid. Si l'on pose la main sur un matériau à forte effusivité, comme un métal, il paraît froid puisqu'il absorbe rapidement la chaleur de la peau.

Dans le même ordre d'idée, la **diffusivité** nous indique la vitesse de diffusion de la chaleur non plus en surface mais à l'intérieur même du matériau. Plus elle est élevée, plus le matériau s'échauffe ou se refroidit rapidement en son cœur.

L'inertie thermique est la combinaison de toutes ces propriétés. Lorsqu'on les connaît, on peut les mettre à profit

Les propriétés thermiques des matériaux de construction							
Matériaux	Massé volumique ρ (kg/m ³)	Conductivité thermique λ (W/m.K)	Capacité thermique volumique S (kJ/m ³ .°C)	Capacité thermique massique (J/kg.°C)	Effusivité thermique spécifique (J/m ² .s.°C)	Diffusivité thermique ($\times 10^{-7}$ m ² /s)	Résistance à la vapeur d'eau (μ)
Acier	7 870	52	1 350	465	14 000	138	-
Aluminium	2 700	204	2 511	896	24 000	916	-
Béton	2 300	1,75	2 160	878	1 945	8	70 à 150
Béton cellulaire	400 à 800	0,10 à 0,22	352 à 700	1 000	278 à 394	6,2 à 3,1	5 à 10
Bois léger (résineux)	400	0,12	960	878	339	1,25	50 à 100
Bois lourd	800	0,23	2 160	2 400	705	1,06	-
Bois panneaux	400 à 600	0,12 à 0,15	1 380	3 000	440	1	50 à 400
Brique terre cuite pleine	1 900	1,15	1 634	2 700	1 370	7	40
Brique terre cuite creuse	700 à 1 000	0,35	630 à 900	-	470 à 560	5,6 à 3,9	5 à 10
Brique monomur (37 cm)	700 à 800	0,15	700 à 800	-	324 à 346	2,1 à 1,9	5
Fibres de bois	50 à 150	0,039 à 0,040	105 à 315	2 000 à 2 100	65 à 112	3,8 à 1,3	2 à 5
Laine de cellulose	35 à 90	0,039 à 0,040	120 à 180		2 000	69 à 85	3,3 à 2,22
Laine de chanvre	25 à 35	0,04	30 à 42	1 300	35 à 41	13 à 9,5	1 à 2
Laine de coton	20 à 30	0,04 à 0,06	38 à 57	1 300	39 à 48	10 à 7	1 à 2
Laine de mouton	10 à 30	0,04	17 à 52	800	26 à 45	23 à 7,8	1 à 2
Laine de roche	40	0,04	33	880	37	12	1 à 2
Laine de verre	15 à 25	0,03 à 0,04	13 à 21	880	22 à 29	32 à 19	1 à 2
Liège expansé	80 à 120	0,03 à 0,04	140 à 210	2 100	70 à 86	2,5 à 1,7	5 à 30
Ouate de cellulose	35 à 45	0,037	68 à 87	1 600 à 1 800	50 à 57	5,4 à 4,2	1 à 2
Parpaing aggloméré	500 à 1 400	0,3 à 0,9	450 à 1 260	-	367 à 1 065	6,7 à 7,1	5 à 15
Pierre calcaire	2 450	2,4	1 760	879 à 882	2 058	14	-
Pierre lourde (granit...)	2 600	3	1 820	881	2 337	16	-
Polystyrène	20 à 30	0,03 à 0,04	27 à 41	1 300	29 à 38	11 à 8,5	20 à 300

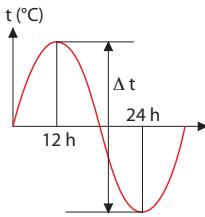
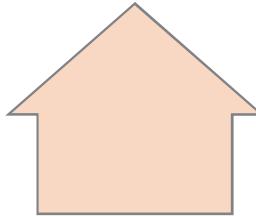
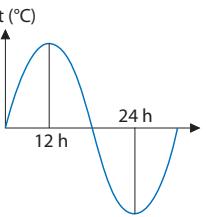
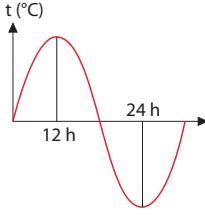
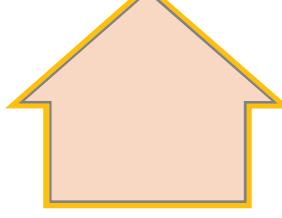
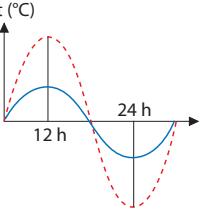
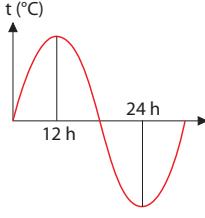
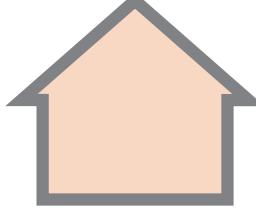
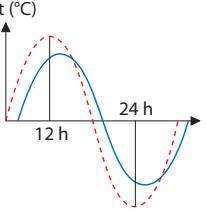
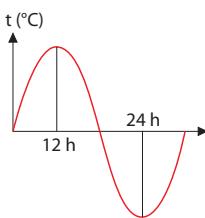
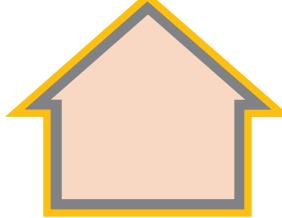
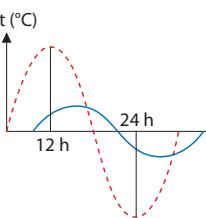
Figure 11 : Les propriétés thermiques des matériaux de construction

pour jouer sur les températures à l'intérieur d'un bâtiment. En effet, on comprend que l'inertie va entraîner un effet retard ou un déphasage entre la variation de la température intérieure et extérieure. Prenons une paroi lourde non isolée. S'il fait froid à l'extérieur, il faudra un certain temps pour que la paroi absorbe du froid, le stocke et le restitue à l'intérieur. Inversement, si l'on chauffe l'intérieur, il faudra un délai avant que la paroi absorbe la chaleur émise dans la pièce et devienne chaude à son tour. On comprend alors que cette propriété physique des corps a une influence importante à l'échelle d'une habitation,

notamment en fonction des matériaux utilisés. Si l'on décide d'isoler cette paroi, son inertie thermique offre des possibilités intéressantes dès lors que l'on respecte ses principes et qu'on les utilise à bon escient.

Prenons un autre exemple pour illustrer le déphasage (figure 12), un bâtiment avec des murs légers et non isolés comme un abri de jardin en tôles. Plaçons un thermomètre à l'intérieur et un autre à l'extérieur et notons les courbes de température. On constate que la courbe intérieure évolue quasi simultanément avec celle de la température extérieure. Du fait

L'amplitude et le déphasage thermiques

Comportement d'une enveloppe opaque sans chauffage et sans ensoleillement		
Variation de la température extérieure	Type d'enveloppe	Variation de la température intérieure
	 Enveloppe légère non isolée	
	 Enveloppe légère isolée	
	 Enveloppe lourde non isolée	
	 Enveloppe lourde isolée par l'extérieur	

(D'après F. Simon & J.M. Hauglustaine, L'isolation thermique de la toiture inclinée)

Figure 12 : L'amplitude et le déphasage thermiques

de la légèreté du matériau constituant les parois, de sa faible épaisseur et de sa grande effusivité, le froid, ou la chaleur extérieure pénètre immédiatement à l'intérieur. Les températures extérieure et intérieure sont égales pratiquement à tout instant. L'inertie est quasiment inexistante. Toute l'énergie consommée pour réchauffer ou refroidir le local serait immédiatement dissipée.

Pour avoir une température plus douce à l'intérieur de l'abri, on décide d'installer des panneaux d'isolant thermique. Que constate-t-on alors ? La variation de température intérieure suit l'évolution de la température extérieure, mais cette fois-ci avec une amplitude moindre. La variation se produit à la même vitesse, cependant les températures extérieure et intérieure sont différentes de quelques degrés. L'écart de température est rendu possible grâce à l'isolation. Si en plus, on pouvait construire de lourds murs en béton en remplacement des tôles, que se produirait-il dans l'abri de jardin ? Son inertie thermique augmenterait considérablement, entraînant un déphasage. Tout au long de la journée et de la nuit, la température intérieure serait influencée par la température extérieure mais seulement après plusieurs heures, à cause de l'inertie des parois.

En ajoutant aux murs lourds une isolation thermique par l'extérieur, notre abri de jardin pourrait combiner et mettre à profit les deux avantages de l'abaissement de l'amplitude de température, grâce à l'isolant, et du déphasage, grâce à l'inertie du

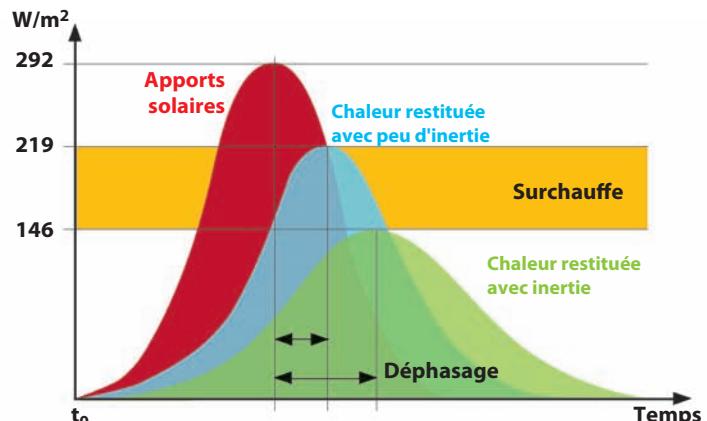
matériau constituant les murs. La température extérieure parviendrait donc diminuée jusqu'à l'intérieur, seulement après plusieurs heures. En été, une bonne inertie peut permettre d'absorber et de répartir les pointes de chaleur pour les rendre plus acceptables. La climatisation n'est pas indispensable. Cependant, il convient de bien gérer la protection solaire afin de limiter les apports le jour. La nuit, la ventilation doit être performante afin d'évacuer la chaleur et de stocker un maximum de fraîcheur qui, grâce au déphasage, sera diffusée à l'intérieur du logement pendant la journée. La période de déphasage optimale est de 12 à 13 heures.

Le déphasage est utile pour le confort d'été, grâce au décalage de temps qu'il permet entre l'évolution de la source de température et son effet de l'autre côté de la paroi. La figure 13 montre ce décalage et la manière dont la chaleur évolue au sein d'une paroi en béton cellulaire selon les heures d'une journée d'été. On peut constater également qu'une paroi légère en bois, bien que naturellement isolante, présente une faible inertie, ce qui est un inconvénient en période estivale et nécessite des dispositions particulières, notamment le choix d'isolants disposant d'une bonne inertie thermique.

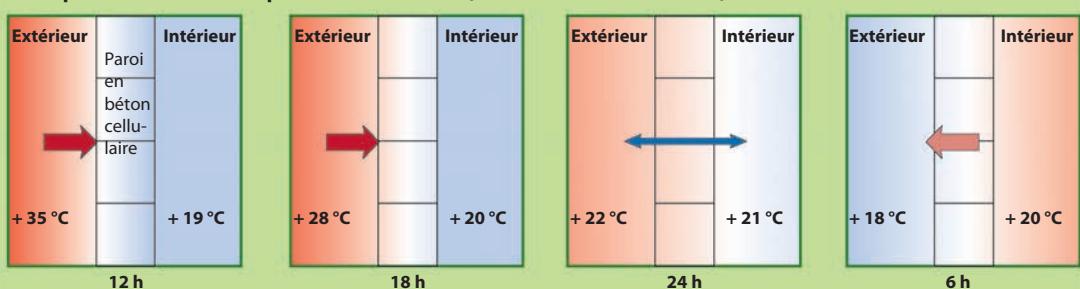
En hiver, il existe de nombreuses sources gratuites ou récupérables de chaleur pour l'habitation, dues aux appareils électroménagers, aux occupants et au soleil. Il est intéressant de pouvoir stocker cette énergie calorifique pour éviter d'avoir recours au système de chauffage. C'est l'inertie

Inertie et confort d'été

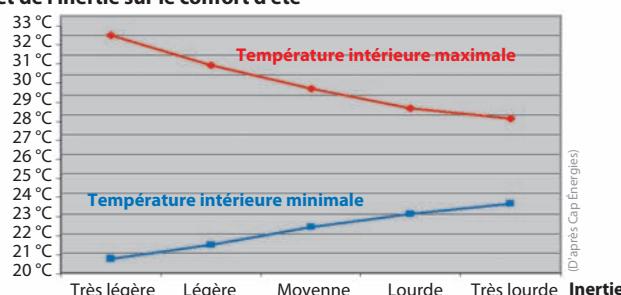
Réaction d'un local selon son inertie en présence d'apports solaires



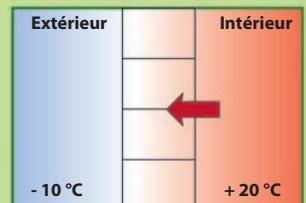
Principe de l'inertie thermique en saison chaude (Monomur béton cellulaire) (D'après Xella)



Effet de l'inertie sur le confort d'été



Confort d'hiver



Retard en heures de différents systèmes constructifs de maisons individuelles

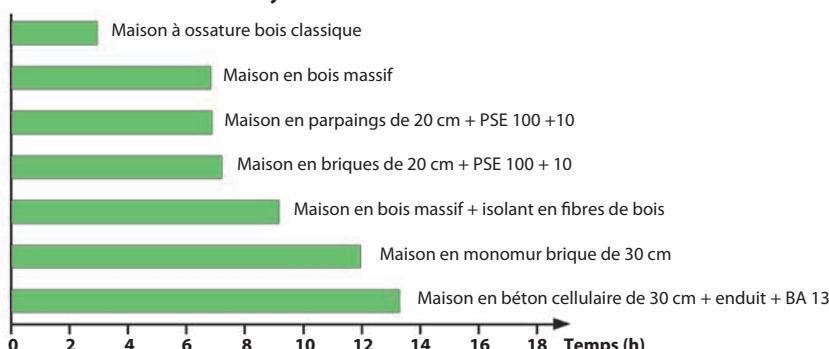


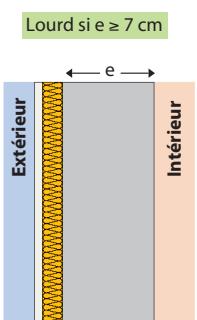
Figure 13 : L'inertie thermique et le confort d'été

Exemples de parois lourdes à forte inertie

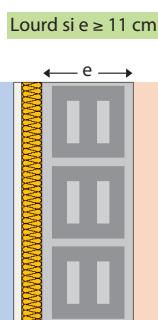
(D'après Cimbéton)

Murs

Isolation par l'extérieur

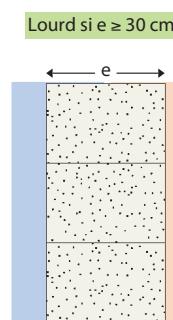


Béton banché, blocs pleins.



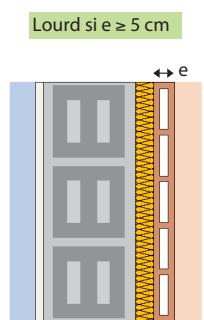
Blocs de béton creux, briques perforées.

Isolation répartie



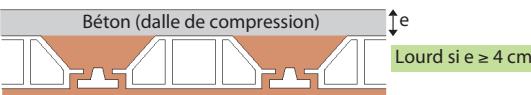
Blocs de béton cellulaire, monomur terre cuite, blocs de granulats légers.

Isolation par l'intérieur

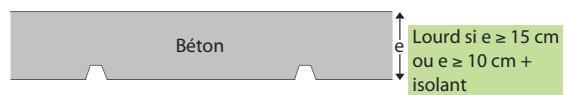


Contre-cloison en briques, carreaux de plâtre ou de béton cellulaire.

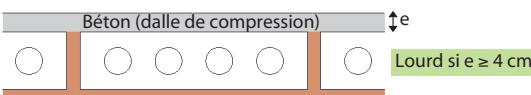
Planchers



Poutrelles et entrevois



Prédalles



Dalles alvéolées



Dalle pleine

Exemples d'inerties

Inertie très faible (A)	Inertie faible (B)	Inertie moyenne (C)	Inertie forte (D)
Plancher bois sur isolant Plafond léger (plaque de plâtre et isolant) Murs isolés par l'intérieur (isolant et plaque de plâtre) Murs à ossature bois Cloisons légères	Comme A avec cloisons en carreaux de plâtre	Comme B avec plancher lourd (10 cm de béton sur isolant)	Plancher en béton Murs lourds isolés par l'extérieur Monomurs d'épaisseur supérieure à 30 cm Cloisons lourdes Plafond lourd (toiture-terrasse)

Figure 14 : Exemples de parois lourdes à forte inertie

d'absorption. De plus, la puissance de chauffage appelée est d'autant moins grande que le déphasage est important. Lorsqu'un pic de froid survient, il n'est pas répercute immédiatement dans le logement, donc le thermostat du système de chauffage ne se déclenche pas dans la foulée. Les déclenchements du thermostat sont plus réguliers et étalés dans le temps.

Toutefois, l'inertie peut être un inconvénient dans certains cas. En hiver, dans les résidences secondaires ou occupées par intermittence, il faut un certain délai pour chauffer les murs avant que l'air ambiant se réchaaffe à son tour. La demande en énergie est alors plus importante en début de chauffe pour un confort limité. Lorsque les occupants s'en vont, alors que les murs ont bien accumulé la chaleur, l'inertie continue de jouer son rôle, mais dans un logement vide.

En été, dans les zones où les nuits ne sont pas fraîches, notamment en ville, la chaleur accumulée le jour se dissipe difficilement la nuit. Si les journées chaudes se succèdent en période de canicule, les infrastructures et le bitume des rues n'ont pas le temps de se décharger, la nuit, de la chaleur accumulée. Il est donc très important dans ce cas de limiter les apports solaires et de surventiler encore plus la nuit.

En conclusion, une inertie satisfaisante doit combiner trois caractéristiques : une forte capacité thermique (murs et planchers lourds en contact avec l'air intérieur), une conductivité élevée et une grande surface d'échange. Pour

ce faire, optez pour une isolation par l'extérieur avec une structure et des planchers en béton. Pour les murs, l'effet d'inertie devient sensible avec des blocs pleins d'une épaisseur minimale de 7 cm ou des blocs creux d'une épaisseur supérieure à 11 cm (figure 14).

Les constructions en monomur, en béton cellulaire ou en terre cuite, d'une épaisseur supérieure ou égale à 30 cm offrent également d'excellentes performances en termes d'inertie thermique.

L'amélioration de l'inertie thermique

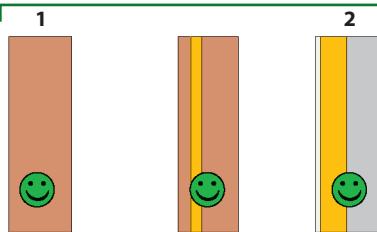
Comme indiqué, l'isolation par l'intérieur annule les effets bénéfiques de l'inertie. Dans ce cas, on peut recourir à des contre-cloisons en briques, en carreaux de plâtre ou en béton cellulaire d'une épaisseur minimale de 5 cm. Les éléments de construction intérieurs jouent également un rôle important dans l'inertie d'absorption du fait de leur superficie d'échange importante (deux faces pour une cloison ou un mur de refend au lieu d'une seule face pour un mur extérieur). Il est donc possible d'améliorer l'inertie grâce aux cloisons, aux murs de refend et aux planchers en choisissant des matériaux lourds (figure 15).

Dans les combles aménageables, il est difficile d'utiliser des matériaux lourds. À cet endroit, le principal matériau mis en œuvre est l'isolant, or, dans ce domaine, les performances

Amélioration de l'inertie thermique

Murs

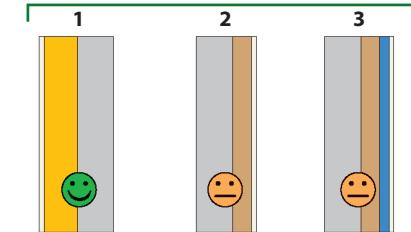
Construction neuve



Isolation répartie : Monomur brique, béton cellulaire, double mur.

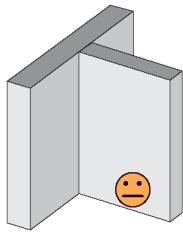
Isolation par l'extérieur.

Rénovation



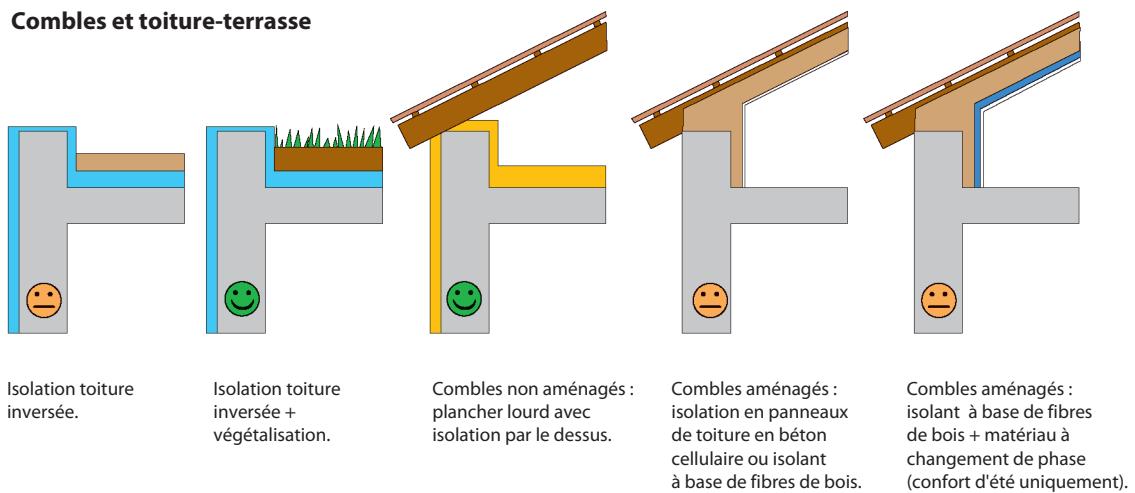
Isolation par l'intérieur à base de fibres de bois.

Isolation par l'intérieur + matériau à changement de phase (confort d'été uniquement).



Solution 2 ou 3 + des cloisons intérieures massives (10 cm) en briques pleines, béton cellulaire, carreaux de plâtre.

Combles et toiture-terrasse



Isolation toiture inversée.

Isolation toiture inversée + végétalisation.

Combles non aménagés : plancher lourd avec isolation par le dessous.

Combles aménagés : isolation en panneaux de toiture en béton cellulaire ou isolant à base de fibres de bois.

Combles aménagés : isolant à base de fibres de bois + matériau à changement de phase (confort d'été uniquement).

Figure 15 : L'amélioration de l'inertie thermique

peuvent varier de façon importante (figure 16). Pour obtenir une bonne inertie dans les combles, le choix de la laine de verre est peu recommandé puisque son déphasage ne dépasse pas 6 heures. La cellulose et les fibres de bois permettent d'atteindre un déphasage de 12 à 15 heures. Les plumes de canard, grâce à leur struc-

ture tubulaire, offrent également une bonne inertie. Ces derniers isolants sont appréciés aussi pour les parois verticales chaque fois qu'il est nécessaire d'améliorer l'inertie thermique, par exemple dans les constructions bois.

Dans une construction existante déjà isolée, il est également possible

Inertie des isolants thermiques				
Type	Conductivité thermique	Densité	Capacité d'accumulation	Déphasage
Laine de verre	0,04 W/m.K	20 kg/m ³	4 Wh/m ³ .K	6 heures 😞
Cellulose	0,04 W/m.K	55 kg/m ³	33 Wh/m ³ .K	12 heures 😊
Fibres de bois	0,04 W/m.K	160 kg/m ³	80 Wh/m ³ .K	15 heures 😊

Figure 16 : L'inertie des isolants thermiques

d'améliorer l'inertie thermique. En optant pour des matériaux à changement de phase (MCP), l'inertie de votre habitation sera sensiblement augmentée.

Le principe des MCP est simple : lorsqu'un corps passe de la phase solide à la phase liquide, il absorbe une certaine quantité de chaleur. Lors du cycle inverse, c'est-à-dire lorsqu'il passe de l'état solide à l'état liquide, il dégage de la chaleur.

Chaque élément a une température de fusion propre et subit ce phénomène à des températures diverses. L'eau se solidifie à 0 °C. D'autres matières deviennent solides à des températures très différentes. En employant des matériaux à faible température de fusion, comme les paraffines, on peut utiliser cette propriété pour améliorer l'inertie thermique. Certains fabricants proposent des plaques de plâtre ou des enduits intégrant des microcapsules d'une paraffine dont la température de fusion est comprise entre 21 et 26 °C. Ainsi, en été, lors des journées chaudes, ces éléments de construction en MCP accumulent de la chaleur. La paraffine contenue dans leurs microcapsules se liquéfie, ce qui a pour effet de refroidir la pièce.

La nuit, lorsque l'air devient plus frais grâce à la ventilation, le contenu des microcapsules se solidifie en restituant la chaleur accumulée. Ainsi, sans consommation d'énergie ni installation complexe, la température est écrétée jusqu'à 7 °C. Il n'y a plus besoin de climatisation, l'environnement est respecté et le confort est amélioré pour les habitants. En hiver aussi, les MCP peuvent jouer un rôle important. En les plaçant aux endroits appropriés de l'habitation, notamment dans les parties ensoleillées, ils peuvent être mis à profit pour stocker les apports diurnes qui seront restitués la nuit.

LA RÉGLEMENTATION THERMIQUE

Depuis 1974, la réglementation thermique sert à fixer les règles à respecter dans les constructions neuves en matière d'isolation afin de réduire la consommation globale d'énergie. La réglementation évolue tous les cinq ans, environ. Elle a pour but de restreindre progressivement l'énergie de chauffage et les émissions de gaz à effet de serre en prenant en

Réglementation thermique RT 2005 et évolution vers BBC Effinergie

La RT 2005

Valeurs maximales (garde-fous)

Parois	U_{paroi} maximale (W/m ² .K)	R_{paroi} minimale (m ² .K/W)
Murs en contact avec l'extérieur ou avec le sol	0,45	2,05
Plancher haut en béton ou en maçonnerie	0,34	2,80
Autres planchers hauts (combles, rampants...)	0,28	3,45
Plancher bas sur vide sanitaire	0,40	2,15
Plancher bas sur local non chauffé	0,40	2,15
Plancher bas donnant sur l'extérieur	0,36	2,60
Plancher bas donnant sur un parking collectif	0,36	2,50
Plancher bas sur terre-plein	-	1,7 R isolant
Plancher bas sur vide sanitaire	2,60	-

Garde-fou des ponts thermiques

Type de pont	ψ maximal en W/m.K
Liaison entre deux parois dont l'une au moins est en contact avec l'extérieur	Maison individuelle : 0,65 Immeuble collectif : 1,00

Valeurs de référence (à atteindre pour être en conformité avec la RT)

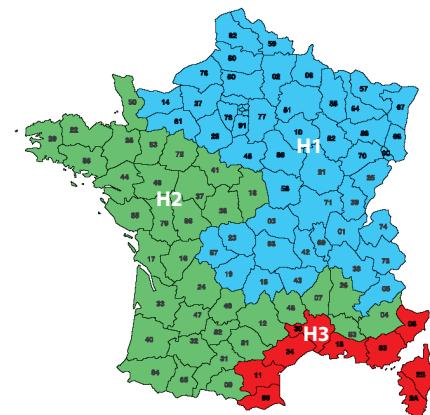
Parois	U_{paroi} (W/m ² .K) Zones H1, H2 et H3 (> 800 m)	U_{paroi} (W/m ² .K) Zone H3 (≤ 800 m)
Murs en contact avec l'extérieur	0,36	0,40
Plancher haut sur extérieur en béton	0,27	0,27
Autres planchers hauts et toitures	0,20	0,25
Planchers bas	0,27	0,36
Fenêtres et portes-fenêtres dans le résidentiel	2,10	2,30

Ponts thermiques	ψ en W/m.K (zones H1, H2 et H3)
Liaison plancher bas/mur	Maison individuelle : 0,40 Logement collectif : 0,40
Liaison plancher intermédiaire sous combles/mur	Maison individuelle : 0,55 Logement collectif : 0,60
Toitures-terrasses/mur	Maison individuelle : 0,50 Logement collectif : 0,60

Perméabilité à l'air (m³/h.m² sous 4 Pa)

Perméabilité par défaut	Maison individuelle : 1,3 Immeuble collectif : 1,7
Perméabilité de référence	Maison individuelle : 0,8 Immeuble collectif : 1,2

Les zones climatiques



Évolution vers le label BBC Effinergie RT 2012

Isolation des parois opaques (R en m².K/W)

Type de paroi	RT 2005	BBC Effinergie RT 2012
R du toit	4 à 6	6,5 à 10
R des murs	2,2 à 3,2	3,2 à 5,5
R d'un sol sur terre-plein	1,7 à 2,9	2,4 à 4
R d'un sol sur vide sanitaire	2,4 à 4	3,5 à 5
Ponts thermiques	Moyens à faibles	Très faibles

Les valeurs minimales sont réservées aux régions les plus chaudes.

Fenêtres et baies

	RT 2005	BBC Effinergie RT 2012
U_w (en W/m ² .K)	2 à 1,6	1,7 à 0,7
Protections solaires	Souvent nécessaires	Indispensables

Conception architecturale

	RT 2005	BBC Effinergie RT 2012
Compacité	Non prévue	Recommandée
Orientation préférentielle au sud	À envisager	Recommandée
Prise en compte du confort d'été	Souvent nécessaire	Indispensable

Figure 17 : Les exigences de la réglementation thermique

compte les intérêts des divers acteurs des marchés concernés. Elle intègre au cours de son évolution la normalisation européenne. La réglementation en vigueur, reprise par le discours commercial, ne correspond pas à la pointe de la performance énergétique que l'on est capable de mettre en œuvre aujourd'hui, contrairement à ce qui se fait notamment, en Europe septentrionale. Les limites prévues par la réglementation impliquent des calculs thermiques complexes des futurs bâtiments en prenant en compte différents facteurs (isolation, déperditions, appareils domestiques...). Elles constituent une base légale minimale pour déterminer les performances des logements, notamment pour le DPE (diagnostic de performances énergétiques) nécessaire lors de la vente ou de la location.

Pour être conforme à la réglementation thermique, un bâtiment neuf doit répondre à plusieurs critères. La consommation annuelle prévisionnelle d'énergie ($C_{bât}$) doit être inférieure à une consommation de référence établie par la norme (C_{ref}). Elle est exprimée en kilowattheures d'énergie primaire par mètre carré de SHON (surface hors œuvre nette) pour une année ($\text{kWh}/\text{m}^2/\text{an}$).

Outre la consommation énergétique, le deuxième facteur considéré est l'isolation thermique. Des performances minimales doivent être respectées selon le type de paroi et la zone climatique. Des valeurs garde-fous sont fixées par la norme concernant les déperditions thermiques.

L'ensemble de ces déperditions pour l'enveloppe du bâtiment ($U_{bât}$), doit

être inférieur aux déperditions de référence ($U_{bât \text{ réf}}$) (figure 17) calculées lors de l'étude thermique. Une majoration de 20 % est admise pour les maisons individuelles. De même, les ponts thermiques et la perméabilité à l'air de l'habitation ne doivent pas dépasser certains seuils précisés par la norme.

Le dernier critère a pour but de limiter la consommation d'énergie due à la climatisation. Il concerne la température intérieure d'été (T_{ic}), qui doit être inférieure à la température de référence ($T_{ic \text{ réf}}$).

Autant que faire se peut, il ne faut pas hésiter à aller au-delà des performances exigées par la réglementation thermique, puisque celle-ci évolue sans cesse et vise comme objectif d'atteindre un niveau équivalent à celui de la maison passive. Dans votre projet, vous n'avez pas forcément besoin de respecter la progressivité de la réglementation qui est destinée plutôt aux professionnels de la construction et à ménager les distributeurs d'énergie. Si votre budget le permet, optez d'emblée pour des solutions réellement efficaces d'un point de vue énergétique. Vous respecterez d'office la réglementation thermique en vigueur et vous vous épargnerez ainsi de fastidieux calculs.

Auparavant, la réglementation thermique ne concernait que les bâtiments neufs. Désormais, des règles s'appliquent aussi aux plus de 30 millions de logements existants. Une distinction est opérée selon le type de bâtiments. Pour ceux dont la surface SHON dépasse $1\ 000\ \text{m}^2$, il

Performances thermiques requises dans l'habitat existant

Parois opaques

Résistances thermiques minimales des parois (R en m ² .K/W)					
Type de paroi	RT bâtiments existants (arrêté du 3 mai 2007)		Label Promotelec habitat existant		Label Promotelec rénovation énergétique et Eco PTZ
	Zones H1 et H2	Zone H3 < 800 m	Zones H1 et H2	Zone H3 < 800 m	
Murs en contact avec l'extérieur et rampants de toiture de pente supérieure à 60°	2,3	2*	2,3	2	≥ 2,8
Murs en contact avec un volume non chauffé	2	2	2,5	2,5	-
Toitures-terrasses	2,5	2,5	3,5	2	≥ 3
Planchers de combles perdus	4,5	4,5	4,5	4,5	≥ 5
Rampants de toiture de pente inférieure à 60°	4	4	4,5	4	
Planchers bas donnant sur l'extérieur ou un parking collectif	2,3	2	2,3	2	≥ 2,8
Planchers bas donnant sur un vide sanitaire ou un local non chauffé	2	2	2	2	≥ 2,8

* Cette valeur peut être adoptée pour les zones H1 et H2 si l'isolation entraîne une diminution supérieure à 5 % de la surface habitable due à l'épaisseur de l'isolant et uniquement dans le résidentiel.

Parois vitrées

Coefficient de transmission thermique U _w maximal (en W/m ² .K)					
Type de baie	Arrêté du 3 mai 2007	Label Promotelec habitat existant	Label Promotelec rénovation énergétique et Eco PTZ		
Ouvrants à menuiserie coulissante	2,6	2,6	Fenêtre ou porte-fenêtre en PVC	1,4	
			Fenêtre ou porte-fenêtre en bois	1,6	
Autres menuiseries	2,3	2,3	Fenêtre ou porte-fenêtre métallique	1,8	
			Vitrage de remplacement (faible émissivité)	1,5	

Résistances thermiques de parois dans l'existant (à prendre en compte pour les calculs)

Mur en briques pleines			
Épaisseur en cm	9 à 15	15 à 22,5	22,5 à 34
Valeur de R	0,09	0,16	0,23
	0,33		

Mur en blocs de béton creux		
Épaisseur en cm	20 à 25	> 25
Valeur de R	0,19	0,22

Mur double en briques pleines avec vide d'air			
Épaisseur en cm	20 à 25	25 à 30	30 à 35
Valeur de R	0,33	0,37	0,43
	0,48		

Mur en blocs de béton pleins ou en béton banché			
Épaisseur en cm	15 à 20	20 à 25	25 à 30
Valeur de R	0,10	0,12	0,15
	0,18		

Mur en briques creuses			
Épaisseur en cm	15 à 20	20 à 25	25 à 30
Valeur de R	0,30	0,35	0,42
	0,44		

Figure 18 :
Les performances thermiques requises dans l'habitat existant

existe, en cas de travaux importants, des exigences proches de la réglementation thermique applicable aux constructions neuves.

Pour les maisons individuelles ou les appartements, en cas de travaux d'isolation ou de remplacement de l'isolation existante, la réglementation prévoit des résistances thermiques pour chaque type de paroi (figures 18). Le choix d'effectuer des travaux d'isolation reste à la discrétion du maître d'ouvrage, ce qui signifie, en pratique qu'il n'y a aucune obligation.

Des organismes comme Promotelec proposent des labels concernant la rénovation (Label Habitat Existant et Label Rénovation Énergétique) et indiquant des valeurs de résistance thermique à atteindre, proches ou supérieures à la norme.

Le label « Rénovation Énergétique » permet de certifier la qualité des travaux de rénovation et la performance énergétique. Il se décline en quatre niveaux identifiés par des étoiles, d'une étoile (consommation finale d'énergie supérieure à 210 kWhep/m²/an), à quatre étoiles (consommation inférieure à 100 kWhep/m²/an).

Il prend en compte l'isolation du bâti, les parois vitrées, le système de chauffage et de ventilation, la régulation, la production d'eau chaude sanitaire. Les mesures concernant le bâti sont plus restrictives que le label « Habitat Existant ».

Ce label permet également l'attribution de la mention « Effinergie Rénovation » si les critères suivants sont respectés :

- la consommation d'énergie primaire est inférieure à 80 kWhep/m² SHON/an ;

- perméabilité à l'air du bâtiment sous une dépression de 4 Pa inférieure à 0,8 m³/h/m² en maison individuelle et 1,3 m³/h/m² en collectif ;
- production locale d'électricité (photovoltaïque, micro-éolien...) déduite des consommations jusqu'à concurrence de 12 kWhep/m²/an ;
- si la SHON dépasse de 20 % la surface habitable, la surface prise en référence pour le label est de 1,2 fois la surface habitable.

La réglementation est destinée à se durcir également à l'avenir dans le parc de logements existants.

Malheureusement, l'impact reste limité dans la pratique. Selon une étude de l'ADEME, 90 % des logements anciens qui font l'objet d'une rénovation présentent des performances thermiques équivalentes à celles qu'ils avaient avant les travaux. L'absence de caractère obligatoire, le manque de formation des entreprises et l'information insuffisante des particuliers expliquent en partie cet état de fait.

Les labels

Dans les constructions neuves, les prescriptions minimales à respecter sont celles de la réglementation thermique en vigueur. Rien ne vous empêche d'aller au-delà des règles édictées, dans le cadre d'une démarche volontaire, notamment si vous souhaitez œuvrer pour l'environnement ou donner une valeur supplémentaire à votre bien. Il existe même des labels destinés à vous aider en ce sens.

Le label Performance

L'association Promotelec dispense le label Performance (figure 19) comprenant cinq niveaux d'exigence. Il porte

sur l'isolation thermique et le chauffage. Il met l'accent sur les équipements de gestion du chauffage et de pilotage des installations. Il couvre toutes les énergies, dont les renouvelables.

Labels et réglementation en France		
Labels	Consommation conventionnelle	Conditions
Réglementation thermique (RT)	Consommation de référence	Exigée pour toutes les constructions neuves.
HPE (haute performance énergétique)	Consommation de référence - 10 %	Consommation énergétique inférieure de 10 % à la consommation de référence définie par la RT en vigueur..
HPE EnR (haute performance énergétique, énergies renouvelables)	Consommation de référence - 10 % + EnR	Exigences du niveau HPE avec au moins 50 % de l'énergie employée pour le chauffage issue d'une installation biomasse ou d'un réseau de chaleur utilisant plus de 60 % d'énergies renouvelables.
THPE (très haute performance énergétique)	Consommation de référence - 20 %	Consommation énergétique inférieure de 20 % à la consommation de référence définie par la RT en vigueur.
THPE EnR (très haute performance énergétique, énergies renouvelables)	Consommation de référence - 30 % + EnR	Consommation énergétique inférieure de 30 % à la consommation de référence définie par la RT en vigueur et avec au moins une des exigences suivantes : - au moins 50 % de la production d'eau chaude sanitaire est assurée par des panneaux solaires et plus de 50 % du chauffage est produit par un générateur utilisant la biomasse ; - au moins 50 % de la production d'eau chaude sanitaire est assurée par des panneaux solaires et plus de 60 % du chauffage est produit par un réseau de chaleur utilisant des énergies renouvelables ; - au moins 50 % de la production d'eau chaude sanitaire et du chauffage est assurée par des panneaux solaires ; - bâtiment équipé d'un système de production d'électricité utilisant les énergies renouvelables, assurant une production annuelle de plus de 25 kWh/m ² SHON ; - bâtiment équipé d'une pompe à chaleur répondant à des caractéristiques minimales ; - immeubles collectifs dont la production d'eau chaude est assurée à plus de 50 % par des panneaux solaires.
BBC (bâtiment basse consommation énergétique)	Consommation maximale de 50 kWhep/m ² /an	Attribué aux bâtiments de logements neufs consommant entre 40 et 75 kWhep/m ² /an, selon la zone climatique et l'altitude .
BBC Effinergie	Consommation maximale de 50 kWhep/m ² /an	Mêmes conditions d'attribution que le Label BBC en intégrant un contrôle de la perméabilité à l'air du bâtiment.

Figure 19 : Labels et réglementation en France

Le premier niveau, HPE (haute performance énergétique), concerne les constructions dont les consommations énergétiques sont au moins inférieures de 10 % à la consommation de référence.

Le deuxième niveau, HPE Enr (haute performance énergétique, énergies renouvelables), est attribué aux bâtiments HPE dont au moins 50 % de l'énergie employée pour le chauffage est issue d'une installation biomasse ou d'une alimentation par un réseau de chaleur utilisant plus de 60 % d'énergies renouvelables.

Le troisième niveau, THPE (très haute performance énergétique), est attribué aux constructions dont les consommations énergétiques sont au moins inférieures de 20 % à la consommation de référence.

Le quatrième niveau, THPE Enr (très haute performance énergétique, énergies renouvelables), a pour objectif un gain de 30 % par rapport à la consommation énergétique de référence. Les constructions concernées doivent utiliser des énergies renouvelables, comme le solaire thermique ou photovoltaïque, la biomasse ou les pompes à chaleur.

Le cinquième niveau, BBC (bâtiment basse consommation énergétique), est attribué aux logements neufs consommant moins de 50 kWhep/m²/an. Ce niveau est modulé au moyen de deux coefficients selon la zone climatique et l'altitude du logement. La performance varie donc de 40 à 75 kWhep/m²/an. Le label BBC reprend la plupart des recommandations du label Effinergie.

Le label Effinergie

L'association Collectifs Effinergie a été créée en 2006 pour promouvoir la construction à très basse consommation énergétique en France. L'initiative, issue des régions, regroupe des organisations professionnelles, des organismes financiers, des associations axées sur l'énergétique, des bureaux d'étude et des experts du CSTB (Centre scientifique et technique du bâtiment). De nombreux partenaires, entreprises ou collectivités locales, rejoignent l'association régulièrement. Effinergie est inspirée de labels européens existants comme Minergie, en Suisse, ou Passivhaus, en Allemagne et en Autriche. L'objectif affiché du collectif est de définir des niveaux de performances énergétiques, pour les constructions et les rénovations, nettement supérieurs à la réglementation en vigueur. L'accent est porté sur la qualité de l'isolation, de l'étanchéité à l'air et sur la maîtrise du renouvellement d'air quelle que soit l'énergie choisie. Ce label permet, entre autres, une réduction des taxes foncières, une extension du COS (coefficient d'occupation des sols) et un crédit d'impôts pour les équipements en énergies renouvelables.

Le label Effinergie peut également être appliqué à l'existant. Dans ce cas, les consommations retenues ne doivent pas dépasser 80 kWhep/m²/an.

L'évolution de la réglementation française est appelée à s'accélérer. Cependant, la création du collectif Effinergie tend à rattraper le retard pris par rapport aux autres labels européens tels que Passivhaus ou

Minergie, présentés dans les paragraphes qui suivent. La RT 2012 est fondée sur le label BBC Effinergie.

Le label Passivhaus

Passivhaus a été créé par Wolfgang Feist et Bo Adamson. Ils ont réalisé la première maison passive à Darmstadt, en 1991. Depuis, des milliers de maisons ont été construites selon ce référentiel en Allemagne, en Autriche, en Belgique ou en Suède.

Une maison passive garantit un climat intérieur confortable pour les habitants aussi bien en hiver qu'en été, sans système de chauffage traditionnel ni de climatisation. Le besoin annuel en énergie pour le chauffage ne doit pas dépasser 15 kWh/m²/an (kilowattheures par mètre carré par an), soit un niveau jusqu'à quinze fois inférieur à la consommation des bâtiments existants. Ce standard, très exigeant, est pourtant possible avec un surcoût modéré de construction. Le terme de maison « passive » désigne le fait que la chaleur est reçue principalement par le rayonnement solaire, les appareils ménagers et les habitants eux-mêmes et non pas émise par un appareil de chauffage. L'apport solaire peut couvrir 40 % des pertes de chaleur. Les fenêtres doivent avoir des performances adaptées (triple vitrage, châssis super isolant).

L'orientation est la même que celle préconisée pour la conception bioclimatique, c'est-à-dire au sud. La surface de vitrage des pièces principales au sud doit représenter de 40 à 50 % de la surface totale. Les vitrages est et ouest ne doivent pas dépasser 20 % et

les fenêtres orientées au nord de 10 à 15 % de la totalité des ouvrants.

L'isolation doit être renforcée, c'est-à-dire que l'épaisseur d'isolant doit être comprise entre 20 et 35 cm (figure 20). Aucun pont thermique n'est permis et l'étanchéité à l'air doit être parfaite, autrement dit, les entrées d'air ne doivent pas dépasser 0,6 volume/h. Attention, cela ne signifie aucunement que l'habitation doit devenir un bocal avec un air en circuit fermé. Au contraire, il est primordial d'avoir recours à un système de ventilation adapté et performant. Le but n'est pas d'empêcher l'air d'entrer, mais plutôt de conserver la chaleur (ou la fraîcheur, en été) de l'air intérieur. L'amenée d'air frais est obligatoirement assurée par un système de VMC double flux avec échangeur de chaleur haute performance, afin de récupérer les calories de l'air chaud vicié extrait pour réchauffer l'air frais entrant. Il est ainsi possible de récupérer jusqu'à 90 % de la chaleur de l'air sortant pour la transmettre à l'air entrant. En utilisant un puits canadien ou une pompe à chaleur, il est également possible de préchauffer l'air frais avant de l'introduire dans l'échangeur. Le principe est réversible en confort d'été, c'est-à-dire que l'on rafraîchit l'air extérieur avant de le faire entrer. L'ensoleillement direct en été doit être contrôlé, comme nous l'avons vu également, par la végétation ou des occultations.

Le surcoût d'une maison passive est de 10 % ou plus, environ, par rapport à une construction traditionnelle. Si le montant peut paraître important sur un budget de construction, il est

Comparaison des valeurs de l'isolation entre les RT et les maisons passives

Parois (U en W/m ² .K)	Valeurs de référence RT 2005	RT 2012**	Maison passive
Murs en contact avec l'extérieur	0,36 ⁽¹⁾ - 0,40 ⁽²⁾	0,18 à 0,31	≤ 0,15
Toiture/plancher haut	0,20 ⁽¹⁾ - 0,25 ⁽²⁾	0,10 à 0,15	≤ 0,15
Plancher bas/sol	0,27 ⁽¹⁾ - 0,36 ⁽²⁾	0,25 à 0,42 ⁽³⁾ - 0,20 à 0,29 ⁽⁴⁾	≤ 0,15
Fenêtres (U en W/m².K)			
Fenêtres et portes-fenêtres	2,10 ⁽¹⁾ - 2,30 ⁽²⁾	0,7 à 1,7	≤ 0,8
Ponts thermiques (ψ en W/m.K)			
Liaison plancher bas/mur	0,40*	< 0,2	< 0,01
Liaison plancher intermédiaire/mur	0,55*	< 0,4	< 0,01
Liaison toiture-terrasse/mur	0,50*	< 0,8 ⁽⁵⁾ - < 1,3 ⁽⁶⁾	< 0,01
(1) : zones H1 et H2	(3) : sol sur terre-plein	(5) : jonction mur/toit en isolation thermique par l'intérieur	
(2) : zones H3	(4) : sol sur vide sanitaire	(6) : jonction mur/toit en isolation thermique par l'extérieur	
* : pour maisons individuelles	** : les valeurs les moins performantes à réservé aux régions les plus chaudes		

Figure 20 : Le niveau d'isolation de la RT et des maisons passives

à contrebalancer avec les gains futurs en énergie, la satisfaction d'avoir une empreinte écologique réduite et le fort potentiel à la revente d'un bien sobre en énergie.

Pour atteindre l'objectif de basse consommation exigé par le label, toutes les valeurs de demande en énergie sont calculées au moyen du logiciel de conception du Passivhaus Institut, le PHPP, en fonction des surfaces habitables nettes de l'habitation.

Né au nord de l'Europe, ce référentiel n'était pas très adapté au climat des pays du Sud. C'est pourquoi le consortium Passive-On a décidé d'édicter des adaptations des prescriptions Passivhaus pour les pays du Sud. L'esprit et la plupart des recommandations restent les mêmes, avec cepen-

dant quelques différences importantes. Par exemple, la demande en énergie de chauffage ne doit pas dépasser 15 kWh/m²/an. Le même niveau doit être respecté en ce qui concerne la climatisation. La consommation totale d'énergie primaire (y compris la production d'eau chaude et l'éclairage) ne doit pas dépasser 120 kWh/m²/an. L'étanchéité à l'air, normalement de 0,6 volume/h, peut atteindre 1 volume/h si la température extérieure ne descend pas en dessous de 0 °C.

Le chauffage, par nature limité, est généralement assuré par le système de VMC double flux ou par une petite chaudière à biomasse (bois). L'électroménager est à choisir dans les gammes d'appareils de classe A (peu consommateurs). Pour l'eau chaude, on peut

installer un CESI (chauffe-eau solaire individuel).

La transposition du modèle Passivhaus est tout à fait possible en France, cependant de nombreux problèmes apparaissent, dus à plusieurs facteurs, notamment d'ordre culturel et de lobbying. En effet, l'accent est mis sur la distribution d'énergie et sur la fourniture d'électricité nucléaire plutôt que sur l'économie d'énergie, et ce malgré les discours officiels. Dans la pratique, les acteurs des marchés sont très en retard par rapport à nos voisins européens.

L'isolation par l'extérieur exige un haut niveau de qualité et de qualification. Elle est encore trop peu répandue, notamment dans le privatif. Ce mode d'isolation remet en cause des habitudes établies depuis des décennies et nécessite d'en finir avec les ponts thermiques. Elle requiert également des épaisseurs d'isolant conséquentes, ce qui est en contradiction avec la recherche de surface habitable maximale, notamment lorsque le marché de l'immobilier est tendu. En effet, la réglementation actuelle est très pénalisante dans ce domaine si l'on considère la surface énorme que représentent 30 cm d'isolant tout autour d'une maison. Sauf cas spécifiques, la part déductible de la SHOB (surface hors œuvre brute), concernant l'isolation, pour obtenir la SHON, est forfaitaire et représente 5 %, ce qui est loin du compte.

Le mode de chauffage est en rupture totale avec les habitudes et le mode de consommation français. La main-d'œuvre est peu ou pas formée à la construction avec une étanchéité élevée

à l'air. Le coût global reste élevé, ce qui décourage les primo-accédants dont le principal souci est souvent d'obtenir les prix les plus bas.

Les règles de construction passive concernent tous les principes constructifs. Il peut s'agir aussi bien d'une maison à ossature bois, d'une maison à isolation répartie (brique ou béton cellulaire) que d'une construction en parpaings. Elles peuvent également s'appliquer en rénovation, cependant la mise en œuvre est plus délicate.

Le label Minergie

Le label Minergie a été créé en 1998, en Suisse. Il correspond en de nombreux points au label Effinergie. La demande de chauffage est limitée à 42 kWh/m²/an en construction neuve et à 80 kWh/m²/an en rénovation. Le principe est le même que la Passivhaus. L'enveloppe est très isolée (15 à 20 cm d'isolant), le plus souvent par l'extérieur. L'étanchéité à l'air doit être correcte. Les fenêtres sont à double vitrage peu émissif. La ventilation peut être mécanique. On a toujours recours à des appareils de chauffage. Les énergies renouvelables sont privilégiées pour l'obtention du label. Les appareils ménagers sont de classe A. Le surcoût d'une construction Minergie est de 6 % environ. Le niveau Minergie-P est une mise à jour du label de base, s'inspirant directement de Passivhaus, avec une consommation de chauffage, eau chaude et climatisation inférieure à 30 kWh/m²/an. Le triple vitrage est nécessaire ainsi qu'un isolant jusqu'à 30 cm d'épaisseur. Si un chauffage d'appoint est nécessaire, il ne doit pas dépasser 10 W/m².

Comparaison de quelques labels européens

Consommations d'énergie primaire

MINERGIE

(Suisse)

 $\leq 42 \text{ kWhep/m}^2\text{.an}$

- = consommation :
- chauffage
- eau chaude sanitaire
- ventilation
- climatisation (par m^2 Shab)

MINERGIE-P

(Suisse)

 $\leq 30 \text{ kWhep/m}^2\text{.an}$

- = consommation :
- chauffage
- eau chaude sanitaire
- ventilation
- climatisation (par m^2 Shab)



(France RT 2012 BBC)

 $< 50 \text{ kWhep/m}^2\text{.an}$

- = consommation :
- chauffage
- eau chaude sanitaire
- ventilation
- éclairage
- auxiliaires (par m^2 Shon)



Passivhaus

(Allemagne, Autriche, Belgique...)

Énergie primaire

Énergie finale = énergie consommée (en kWh)
 Énergie primaire = énergie consommée + énergie nécessaire à la production de cette énergie (en kWhep : kWh équivalent pétrole)
 Shab = surface habitable (Suisse)

Consommations d'énergie primaire maximales selon les RT 2005 et RT 2012

Type de chauffage	Zone climatique	Consommation d'énergie primaire :	
		- chauffage	- eau chaude sanitaire
		RT 2005	RT 2012*
Combustibles fossiles (gaz, fioul...)	H1a	130	60
	H1b		65
	H1c		60
	H2a	110	55
	H2b		50
	H2c		50
	H2d		45
Chauffage électrique (y compris pompe à chaleur)	H3	80	40
	H1a	250	60
	H1b		65
	H1c		60
	H2a	190	55
	H2b		50
	H2c		45
	H2d		40
	H3	130	40

* Valeur pour le résidentiel, altitude inférieure à 400 m, hors modulation Mcsurf.

 $< 25 \text{ kWh/m}^2\text{.an}$

- = besoins en chauffage

 $< 120 \text{ kWhep/m}^2\text{.an}$

- = consommation :
- chauffage
- eau chaude sanitaire
- ventilation
- climatisation
- éclairage
- auxiliaires
- électroménager (par m^2 Shab)

dont

 $< 15 \text{ kWh/m}^2\text{.an}$

- = besoins en chauffage

Énergie finaleÉnergie primaire = énergie finale \times n

n = coefficient de conversion

n = 2,58 pour l'électricité en France (2 en Suisse et 2,70 en Allemagne).

n = 1 pour le gaz et le fioul en France.

n = 0,6 pour le bois en France (0,5 en Suisse et 0,2 en Allemagne).

Carte des zones climatiques

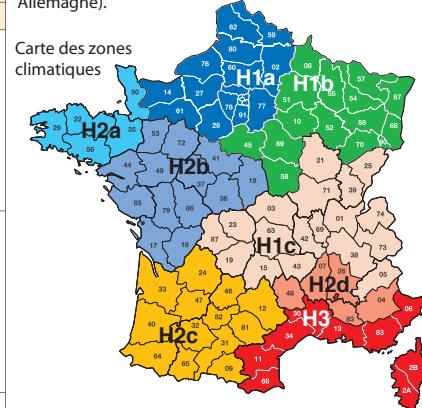
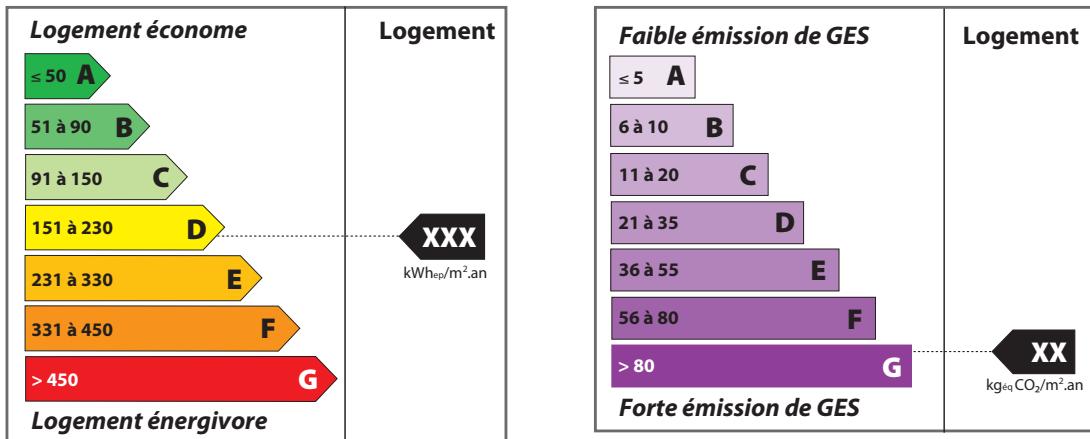


Figure 21 : Les labels européens

Pour quelque label que ce soit, les méthodes de conception bioclimatiques sont exigées ou fortement recommandées.

Il existe de nombreux autres labels en Europe (figure 21) et dans le

monde : Maison 3 Litres en Allemagne, Building America, Leed et Zero Energy Homes aux États-Unis, KlimaHaus en Autriche, Casa Clima en Italie, Zaleh en Nouvelle-Zélande, Breeam en Grande-Bretagne, etc.



L'étiquette énergie indique la consommation d'énergie primaire en kWh_{EP}/m².an

L'étiquette climat indique le taux d'émissions de gaz à effet de serre (GES) en kg_{éq}CO₂/m².an

Figure 22 : Les étiquettes énergie du DPE

Le diagnostic de performances énergétiques

Le DPE (figure 22) permet d'identifier les consommations prévisionnelles d'énergie des logements et des bâtiments mis en vente ou loués. La performance énergétique est indiquée par une estimation chiffrée en euros et par l'utilisation d'étiquettes similaires à celles utilisées pour l'électroménager et les voitures. L'une indique la consommation, l'autre permet de connaître l'impact de la consommation d'un logement sur l'effet de serre. L'estimation de la consommation d'énergie est déterminée grâce à un diagnostic effectué par un professionnel, par calculs, ou sur la base des consommations des trois dernières années.

L'estimation donnée est indicative et ne constitue pas une garantie contractuelle. En d'autres termes, il n'y a pas d'obligation de travaux ni de mise en conformité. Elle permet d'évaluer la qualité d'un bien pour une meilleure négociation entre parties, à la vente comme à la location. Le vendeur ou le bailleur doit tenir ce document à la disposition de l'acheteur ou du candidat locataire dès qu'il en fait la demande.

Les professionnels formés à la réalisation de ces diagnostics sont référencés chez les intermédiaires immobiliers, les notaires et dans les points Espaces Info Énergie de l'ADEME dont la mission est de renseigner le public sur le DPE et sur les économies d'énergie.