

4.10 Caractéristiques thermiques

4.10.1 Coefficient de conductivité thermique λ

Le coefficient de conductivité thermique λ exprime la quantité de chaleur transmise par heure à travers un matériau d'une superficie de 1m^2 et d'une épaisseur de 1m lorsque la différence de température entre les deux faces opposées est de 1 degré Kelvin (symbole K).

La valeur λ dépend de la nature du matériau et de sa teneur en humidité. Plus la valeur λ d'un matériau est petite, plus sa capacité d'isolation est grande.

L'on utilise le symbole λ_i (intérieur) pour des matériaux qui ne peuvent être mouillés par la pénétration d'eau de pluie, la condensation permanente ou par l'humidité ascensionnelle du sol.

4.10.2 Coefficient de conductibilité thermique λ pour murs en blocs de béton cellulaire

En Belgique, il est recommandé de suivre l'approche européenne (CEN) et d'utiliser les valeurs de conductibilité thermique conformément aux normes européennes.

Nous donnons, ci-après, les valeurs telles qu'elles sont mentionnées dans les normes européennes. Ce sont des valeurs maximales pour matériaux certifiés. Il se peut que le fabricant de blocs de béton cellulaire puisse produire de meilleures valeurs (valeurs déclarées – declared values) en se prêtant à certains contrôles. Prendre contact avec le fabricant à cet effet.

Normes européennes :

EN 1745 (2002) :

Maçonnerie et produits de maçonnerie – Détermination des valeurs thermiques de calcul

EN 12524 (2000) :

Matériaux et produits pour le bâtiment – Propriétés hygrothermiques – Valeurs utiles tabulées

EN ISO 10456 (2000) :

Isolation thermique – Matériaux et produits du bâtiment – Détermination des valeurs thermiques déclarées et utiles

EN ISO 6946 (2003) :

Composants et parois de bâtiments – Résistance thermique et coefficient de transmission thermique – Méthode de calcul



1) Valeurs de base des blocs de béton cellulaire

Les valeurs de base à prendre en considération sont les valeurs de la EN 1745 Tableau A.10 – $\lambda_{10,dry}$ basé sur le fractile 90% au niveau de confiance 90%.

Masse volumique (kg/m^3)	$\lambda_{10,dry}$ (W/mK)
400	0,110
500	0,130
600	0,160

2) Valeurs utiles des murs en béton cellulaire collés (design values)

Les valeurs utiles $\lambda_{U,i}$ et $\lambda_{U,e}$ pour le calcul de la conductivité thermique sont déterminées d'après les formules et les coefficients indiqués dans les normes EN 1745, EN 12524 et EN ISO 10456 :

$$\lambda_{U,i} = \lambda_d \cdot e^{fu \cdot (u_2 - u_1)} \quad \text{avec}$$

λ_d = valeur de base des blocs de béton cellulaire d'après EN 1745 - tableau A.10 - $\lambda_{10,dry}$

$$u_1 = 0$$

$$u_2 = 0,026 \text{ kg/kg}$$

$$f_u = 4 \text{ kg/kg}$$

$$\lambda_{U,e} = \lambda_d \cdot e^{fu \cdot (u_2 + u_1)} \quad \text{avec}$$

λ_d = valeur de base des blocs de béton cellulaire d'après EN 1745 - tableau A.10 - $\lambda_{10,dry}$

$$u_1 = 0$$

$$u_2 = 0,150 \text{ kg/kg}$$

$$f_u = 4 \text{ kg/kg}$$

Masse volumique (valeur de calcul) (kg/m ³)	λ valeurs utiles
	$\lambda_{U,i}$ (W/mK)
300	0,09
400	0,120
500	0,140
600	0,180

Pour une masse volumique intermédiaire (par exemple 435 kg/m³), il faut interpoler dans le tableau ci-dessus.

$\lambda_{U,i}$: est utilisé pour les matériaux qui sont protégés contre la pénétration de la pluie, comme par ex. les murs intérieurs, la paroi intérieure d'un mur creux extérieur, les murs extérieurs protégés par un crépi, un bardage ou un autre revêtement étanche.

$\lambda_{U,e}$: est utilisé pour les matériaux qui peuvent être mouillés par la pluie ou autres sources d'humidité.

3) Valeurs utiles des dalles de bardage en béton cellulaire (design values)

Masse volumique (kg/m ³)	λ valeurs utiles	
	$\lambda_{U,i}$ (W/mK)	$\lambda_{U,e}$ (W/mK)
300	0,09	
400	0,120	
500	0,140	
600	0,180	0,29

4) Valeurs utiles des dalles de toiture en béton cellulaire (design values)

Masse volumique (kg/m ³)	$\lambda_{U,i}$ (W/mK)
400	0,120
500	0,140
600	0,180

Note: Ces valeurs de $\lambda_{U,i}$ sont celles mentionnées dans la norme belge. Certains fabricants produisent de meilleures valeurs (declared value). Prendre contact avec le fabricant à cet effet.



4.10.3 Valeurs de résistance thermique R

La résistance thermique R d'un matériau est le produit de son épaisseur e, exprimée en m, divisée par le coefficient de conductivité thermique λ .


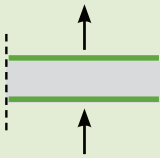
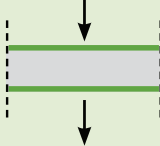
$$R = \frac{e}{\lambda} \quad [\text{m}^2 \text{ K/W}]$$

4.10.4 Résistance thermique totale R_T d'une paroi

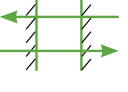
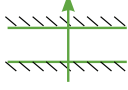
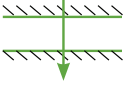
La résistance thermique totale R_T d'une paroi est la somme des résistances R des matériaux qui la composent, à laquelle s'ajoutent les résistances des surfaces intérieures R_i , extérieures R_e et de lame d'air R_a éventuelle.

Elle s'exprime en $\text{m}^2 \text{ K/W}$.

Les valeurs R_{si} , R_{se} et R_a peuvent varier en fonction de la direction du flux de chaleur, comme l'indiquent les tableaux ci-dessous (EN ISO 6946).

Valeurs de résistance thermique R_{si} et R_{se}		
Direction du flux thermique	R_{si} ($\text{m}^2\text{K/W}$)	R_e ($\text{m}^2\text{K/W}$)
	0,13	0,04
	0,10	0,04
	0,17	0,04

La valeur R_a d'une couche d'air non ventilée est, suivant la norme EN ISO 6946.

EN ISO 6946 : Résistance thermique de couches d'air non ventilées R_a (m ² K/W)			
Épaisseur de la couche d'air	Inclinaison des couches d'air et direction du flux de chaleur		
	Couches d'air verticales	Couches d'air horizontales	Couches d'air horizontales
			
Les deux plans avec $e \geq 0,82$ (émissivité)			
5 mm	0,11	0,11	0,11
10 mm	0,15	0,15	0,15
25 mm	0,18	0,16	0,19
50 mm	0,18	0,16	0,21

Note : Les valeurs intermédiaires peuvent être obtenues par interpolation linéaire.

Si la couche d'air verticale d'un mur est peu ventilée (aération : 15cm² par mètre de mur) ce qui semble être le cas le plus fréquent, cette valeur est à diviser par 2, soit $R_a = 0,09$

4.10.5 Coefficient de transmission thermique U des parois

Le coefficient U exprime la quantité de chaleur traversant une paroi (épaisseur) en régime permanent, par unité de temps (heure) par unité de surface (m²) et par unité de différence de température entre les ambiances de part et d'autre de cette paroi.

Il s'exprime en W/m²K.

Le calcul tient compte de la totalité des résistances thermiques (R_T) des matériaux et de lame d'air éventuelle (R_a) auxquelles s'ajoutent les résistances superficielles extérieure (R_{se}) et intérieure (R_{si}).

$$U = \frac{1}{R_T} = \frac{1}{R_{se} + \sum \frac{e}{\lambda} + R_a + R_{si}} \quad (\text{W/m}^2\text{K})$$

Depuis mi 2008 la réglementation sur la performance énergétique des bâtiments (PEB) est entrée en vigueur dans toutes les régions de Belgique.

Les constructions neuves et les rénovations appelées à être chauffées ou refroidies et pour laquelle est introduite une demande de permis de bâtir, doivent dorénavant répondre à plusieurs critères plus stricts.

Exigences PEB			
	U_{\max} mur extérieur	U_{\max} toiture et plafond	K_{\max} habitation
Flandre	0,6 (0,4)*	0,4 (0,3)*	K45
Bruxelles	0,4	0,3	K40
Wallonie jusqu'à 30/08/09	0,5	0,3	K45
Wallonie à partir de 01/09/09	0,4		

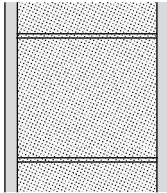
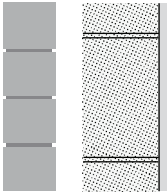
* à partir de janvier 2010

Les murs réalisés en blocs de béton cellulaire collés répondent facilement à ces exigences.

Les chiffres repris dans le tableau, ci-après, indiquent que les performances thermiques des parois, exigées par les régions, sont facilement atteintes par les différentes solutions en béton cellulaire proposées et ce, sans faire appel à l'application d'isolants complémentaires.

Dans la Flandre et la Wallonie les immeubles industriels chauffés doivent répondre au niveau K55, et dans la région bruxelloise les valeurs U_{\max} sont d'application pour les murs et toitures.

Valeurs U de parois en béton cellulaire

Description du mur	Béton cellulaire			Coefficient U du mur (W/m ² K)
	Epaisseur (mm)	Masse vol. (kg/m ³)	$\lambda_{U,i}$ (W/mK)	
 <p>Mur massif en blocs de béton cellulaire collé + crépi extérieur de 12 mm et enduit intérieur de 10 mm</p>	240	400	0,120	0,45
		500	0,140	0,52
		600	0,180	0,65
	300	400	0,120	0,37
		500	0,140	0,43
		600	0,180	0,54
 <p>Mur double en blocs collés de béton cellulaire + parement en briques de 90 et enduit intérieur de 10 mm</p>	200	400	0,120	0,49
		500	0,140	0,56
		600	0,180	0,68
	240	400	0,120	0,42
		500	0,140	0,48
		600	0,180	0,59
	300	400	0,120	0,35
		500	0,140	0,40
		600	0,180	0,49

Ces valeurs de $\lambda_{U,i}$ sont celles mentionnées dans la norme belge. Certains fabricants de blocs de béton cellulaire produisent de meilleures valeurs (declared value). Prendre contact avec le fabricant à cet effet.

Le fait de ne pas devoir ajouter d'isolant permet d'éviter :

- Une opération de mise en œuvre complémentaire et délicate.
- Un contrôle accru de la part du maître d'œuvre.
- Les risques fréquents de ponts thermiques dus à la pose non parfaitement jointive des éléments isolants rapportés (les ponts thermiques sont source de condensations, de moisissures et d'inconfort).
- Une chute du pouvoir isolant de la paroi causée par la circulation d'air froid entre l'isolant et le mur, rarement plan (blocs de gros œuvre irréguliers, joints épais débordants), sauf intervention complémentaire d'égalisation de la paroi.
- Les risques de ponts d'humidité lorsque, lors de la mise en œuvre ou ultérieurement, l'isolant est en contact à la fois avec le parement et le mur porteur.

Compte tenu de leur caractères a priori inqualifiables mais pourtant réels et néfastes, ces ponts thermiques et d'humidité ne sont pas pris en compte lors des calculs d'isolation thermique. Outre les inconvénients d'inconfort qu'ils entraînent, ils sont source de consommation supplémentaire de chauffage.

Les solutions en béton cellulaire évitent facilement ces pièges. En effet :

- La tolérance dimensionnelle des produits (max 2 mm) permet d'atteindre facilement la planéité des parois.
- La grande dimension des blocs et la pose au mortier colle réduit les joints à 1% de la masse (et de la surface). Ceux-ci étant de l'ordre de 2 mm, ne causent pas de ponts thermiques.

- La répartition judicieuse, dans la masse du béton cellulaire, des minuscules cellules fermées (\varnothing max 2 mm) emprisonnent l'air et assurent une isolation thermique uniformément répartie dans toute la masse des parois.

Ces éléments confortent le maître d'œuvre quant au résultat escompté et rassure le maître d'ouvrage sur la pérennité de son isolation thermique et les résultats qu'il en escompte.

4.10.6 Température de surface

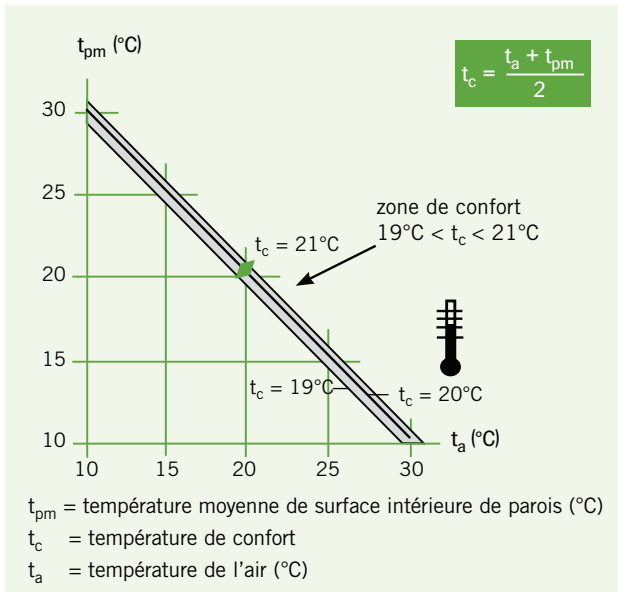
Le confort thermique d'une habitation est une "sensation de bien-être" que procure essentiellement la température de confort " t_c ". Elle est définie comme la moyenne entre la température ambiante " t_a " et la température moyenne de surface intérieure des parois du local " t_{pm} ":

$$t_c = \frac{t_a + t_{pm}}{2}$$

La zone de confort se situe entre 19°C et 21°C .

Il ne suffit pas de chauffer, même fort (ce qui peut être source d'inconfort et nuisible pour la santé) pour ressentir une sensation de confort. Il faut plutôt s'assurer que dans chaque pièce la température souhaitée soit régulièrement répartie et soit la même, ou à peu près, que se soit près des murs ou près de la source de chaleur.

Il faut pour cela que les parois à déperditions (murs, plafonds, planchers, ...) conservent, grâce à un bon pouvoir isolant, une température aussi proche que possible de celle de l'air ambiant.



Par une température extérieure de -10°C , le côté intérieur d'un mur extérieur non isolé, aura 8°C de moins que la température d'ambiance. Si vous chauffez à 24°C , le mur aura 16°C et la température ressentie sera

$$t_c = \frac{24 + 16}{2} = 20^\circ\text{C}$$

Le même mur, isolé conformément aux exigences régionales (coef. $k = 0,60 \text{ W/m}^2\text{K}$), n'aura que 2°C de différence par rapport à l'air ambiant, dans les mêmes conditions atmosphériques. Il vous suffit alors de chauffer à 21°C pour obtenir le même résultat puisque

$$t_c = \frac{21 + 19}{2} = 20^\circ\text{C}$$

Il s'agit bien du même confort théorique alors que dans la pratique, dans le cas du mur isolé, la température sera relativement uniforme dans toute la pièce, tandis que l'on aura en hiver une sensation de froid en s'approchant des murs lorsque ceux-ci ne sont pas isolés.

Les chiffres cités ci-dessus émanent du Centre Scientifique et Technique de la Construction (C.S.T.C.) qui a calculé par ailleurs que chaque degré exigé en moins à l'installation de chauffage, représente 8% d'économie d'énergie.

Or en béton cellulaire, tous les murs extérieurs d'habitation ont un coefficient k plus performant se situant entre 0,34 et 0,51 pour les densités généralement utilisées pour ce type de construction. (voir § 4.10.5.)

Si lors du projet de construction vous pouvez associer isolation thermique et inertie thermique, (c'est le cas du béton cellulaire) en hiver et en mi-saison vous bénéficierez en plus et au maximum des apports gratuits de calories dispensées par le rayonnement solaire, et ce sans surchauffe momentanée. Vous maintiendrez donc un bon niveau de confort tout en diminuant les heures de fonctionnement du chauffage en hiver et en réduisant la période de chauffe en mi-saison. Voilà autant d'économies complémentaires.

4.10.7 Inertie thermique

4.10.7.1 Généralités

Outre l'isolation thermique d'un bâtiment, d'autres paramètres vont influencer le confort thermique général. Ces différents paramètres sont la capacité thermique, le temps de refroidissement, la température de surface, l'amortissement thermique et le déphasage.

Comme nous allons le voir, ci-après, le béton cellulaire combine de façon optimale ces différents paramètres, et offre ainsi un excellent confort de vie.

4.10.7.2 Capacité thermique

Tout matériau de construction absorbe une certaine quantité de chaleur quand la température environnante s'élève. Cette quantité de chaleur qu'un matériau absorbe par m^2 et par degré d'augmentation de température est appelée capacité thermique :

$$Q_s = c \cdot \rho \cdot e \quad [\text{J/m}^2\text{K}]$$

- Avec Q_s = la capacité thermique
 c = la chaleur spécifique en $\text{J/kg} \cdot \text{K}$
 ρ = la masse volumique sèche en kg/m^3
 e = l'épaisseur en m.

Le tableau ci-dessous compare la capacité thermique de différents matériaux pour une épaisseur identique de 300 mm.

Matériau	c (J/kg K)	ρ (kg/m ³)	e (m)	Q _s (J/m ² K)	λ _{UI} (W/mK)	A (h)
Béton cellulaire	1000	400	0,3	120000	0,120	83
Béton cellulaire	1000	500	0,3	150000	0,140	89
Béton cellulaire	1000	600	0,3	180000	0,180	83
Brique	1000	1800	0,3	540000	0,730	62
Béton	1000	2000	0,3	600000	2,100	24
Polystyrène expansé	1450	20	0,3	87000	0,040	2

En examinant le tableau ci-dessus, on constate que la capacité thermique d'un matériau de construction est d'autant plus élevée que la masse volumique est élevée. Ainsi, un béton armé aura une très bonne capacité thermique (Q_s).

On entend souvent dire qu'une capacité thermique élevée garantit une meilleure régulation thermique dans un bâtiment. Cette affirmation n'est pas correcte. Ainsi, par exemple, pour un mur extérieur, une partie de la chaleur emmagasinée est évacuée vers l'extérieur lors des baisses de température. Cette chaleur ne peut donc pas participer à la régulation thermique du bâtiment.

Pour compenser les fluctuations thermiques, il est important d'avoir une capacité thermique élevée, mais également un coefficient de conductivité thermique λ faible. Ainsi, non seulement le mur peut emmagasiner la chaleur, mais il peut la « stocker » pour la restituer au moment le plus opportun.

Pour étayer cette affirmation, introduisons la notion de « temps de refroidissement ».

4.10.7.3 Temps de refroidissement

Le refroidissement d'un mur dépend du rapport entre sa capacité thermique Q_s et son coefficient d'isolation.

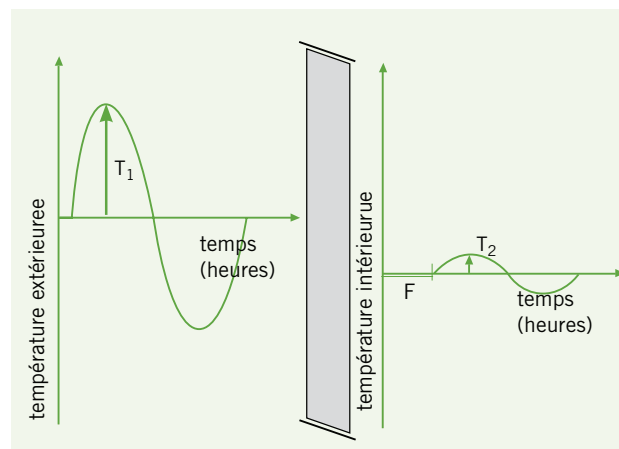
$$\text{Ainsi, on a } A = \frac{Q_s \cdot e}{\lambda \cdot 3600} \text{ [h]}$$

Avec A, le temps de refroidissement est exprimé en heures. Au plus grand est le facteur A, au plus le mur mettra du temps à refroidir. Les fluctuations externes de température se feront également ressentir plus tard à l'intérieur. Le tableau 1 montre qu'à épaisseur égale, le coefficient A est plus important pour le béton cellulaire que pour les autres matériaux usuels de construction. Ceci car le béton cellulaire combine deux éléments essentiels pour obtenir un bon coefficient A, c'est-à-dire, une masse non négligeable ainsi qu'une bonne valeur d'isolation thermique.

4.10.7.4 Amortissement thermique et déphasage

Durant les mois d'été, les bâtiments sont soumis aux heures chaudes à des températures externes relativement importantes dues aux radiations solaires. Ces hausses de température extérieure peuvent mener à des hausses de température intérieure désagréables pour les occupants du bâtiment.

Un bon amortissement thermique du mur, ainsi qu'un déphasage important vont permettre de diminuer, à l'intérieur d'une construction, l'influence de la hausse de température extérieure.



Le déphasage F est le décalage en heures entre les maxima de température extérieure et intérieure.

L'amortissement μ est le rapport entre l'amplitude maximale de température extérieure et l'amplitude maximale de température intérieure : $\mu = T_1/T_2$.

Le déphasage et l'amortissement peuvent être calculés selon la méthode de Hauser/Gertis, en faisant appel aux transformées de Fourier.

On obtient ainsi les résultats repris au tableau ci-dessous [25]

Matériau	ρ (kg/m ³)	λ (W/mK)	e (m)	Amortissement μ	Déphasage F (h)
Maçonnerie de béton cellulaire	400	0,120	0,24	9,09	11,4
Dalles de bardages et de toiture en béton cellulaire	600	0,16	0,24	7,14	9,7
	500	0,14	0,20	8,06	8,7
Matériau isolant pur	20	0,04	0,10	1,43	2,1
	20	0,04	0,15	1,49	3,1
Béton	2400	2,1	0,20	1,61	4,0
	2400	2,1	0,25	2,27	6,0
Bois	600	0,13	0,10	2,50	6,0

De ce tableau, il ressort que :

- 1) Pour le béton cellulaire, l'amortissement est important. Au plus grand est l'amortissement, au plus basse est la température intérieure. Ainsi, par forte chaleur, la température intérieure sera plus faible avec le béton cellulaire qu'avec beaucoup d'autres matériaux.
- 2) Le déphasage est également plus important avec le béton cellulaire. L'avantage d'un déphasage important est qu'un maximum de température extérieure aux heures du midi ne se fera ressentir qu'en fin de journée. Ainsi il suffira d'une simple ventilation en soirée pour rafraîchir l'atmosphère.
- 3) Les matériaux isolants purs présentent un déphasage et un amortissement faibles. Si le soleil frappe à midi sur une toiture composée d'éléments non massifs, et d'isolant pur, la température intérieure deviendra vite insupportable sans air conditionné. C'est ce qu'on appelle l'effet caravane (bonne isolation thermique, mais inertie thermique nulle).

Le béton cellulaire offre donc non seulement un excellent confort en hiver, mais également un excellent confort en été, en conservant la fraîcheur à l'intérieur du bâtiment.

En construction industrielle ou de surface commerciale, ce confort thermique est tout aussi facilement atteint en réalisant les toitures et les bardages en dalles armées de béton cellulaire. A l'usage, ce confort est d'autant plus apprécié si l'on compare un bâtiment en béton cellulaire à un autre, recouvert de matériaux non massifs (par ex. tôle métallique + isolant).

Attention :

Les surfaces vitrées sont source de surchauffe intérieure et atténuent le bénéfique "confort" engendré par le béton cellulaire. Il est donc toujours souhaitable de protéger, par l'extérieur, les fenêtres des rayons solaires.

4.10.8 Exigences thermiques régionales

Outre les valeurs U maximum pour les surfaces de déperditions thermiques (murs, fenêtres, portes, toitures, ...), les régions imposent pour la plupart des constructions neuves et des transformations, un niveau d'isolation thermique globale K à ne pas dépasser.

C'est le cas pour :

- les logements
- les écoles
- les bureaux
- les bâtiments d'hébergement (par exemple hôpitaux, hôtels, homes, internats, casernes, prisons).
- les immeubles industriels chauffés

Chaque région a également des impositions concernant la ventilation et la consommation énergétique du bâtiment (réglementation PEB). En Wallonie on impose également un débit de ventilation minimal.