



LES MATERIAUX ET L'INERTIE THERMIQUE



Jean-Louis IZARD
Julie LELONG
Laboratoire ABC, ENSA-Marseille

LES MATERIAUX ET L'INERTIE THERMIQUE

Jean-Louis IZARD
Julie LELONG, étudiante en cycle maîtrise d'architecture
ENSA-Marseille

Introduction

Pour maîtriser l'inertie thermique d'un bâtiment en phase de projet, il est nécessaire de connaître les caractéristiques des matériaux qu'il faut choisir et mettre en œuvre pour avoir une influence sur cette importante propriété du bâtiment.

81 matériaux ont été sélectionnés pour figurer dans les tableaux qui donnent ces caractéristiques (conductivité thermique, chaleur spécifique, masse volumique, chaleur massique, diffusivité thermique et effusivité thermique, auxquelles sont jointes les dérivées de la diffusivité que sont la vitesse de transfert et la profondeur de peau thermique pour la période de 24 heures).

Les matériaux sont d'abord présentés par famille (**Bois et végétaux, Isolants et plastiques, Mortiers et plâtres, Pierres et bétons, Verres et métaux**). Les tableaux donnent également l'origine des informations contenues.

Ensuite, ces matériaux sont classés toutes catégories confondues en fonction de leurs valeurs de diffusivité et d'effusivité thermiques remarquables (les 25 plus élevées et les 25 plus faibles).

Les questions de la position de l'isolant dans une paroi bi-couche et celle de la diffusivité et de l'effusivité des matériaux alvéolaires (parmi lesquels on trouve le monomur) sont traitées sous forme d'encart à la fin de l'article.

1 - Rappel des propriétés des matériaux contribuant à la définition de l'inertie thermique

Les propriétés des matériaux concernées sont :

La conductivité thermique λ , aptitude d'un matériau à conduire la chaleur par unité de largeur et par degré de différence de température.

Unité: W/m.°C.

Rappelons que la conductivité thermique λ est très liée à la masse volumique: les matériaux "légers" sont souvent des matériaux isolants alors que les matériaux "lourds" sont conducteurs.

La chaleur spécifique ρ , capacité d'un matériau à stocker la chaleur par unité de masse et par degré de différence de température

Unité: Wh/kg.°C.

La masse volumique C : Masse d'un matériau ramenée à l'unité de volume.

Unité : kg/m³.

Le produit ρC représente donc la **chaleur volumique**.

Unité : Wh/m³.°C

La diffusivité thermique a , exprime la capacité d'un matériau à transmettre (rapidement) une variation de température.

$$a = (\lambda / \rho C)$$

Unité: m²/s ou m²/h

L'effusivité thermique b , exprime la capacité d'un matériau à absorber (ou restituer) une puissance thermique.

$$b = (\lambda \cdot \rho C)^{1/2}$$

Unité: J.m⁻².°C^{-1/2}. s^{-1/2} ou Wh^{1/2}.m^{-1/2}.°C^{-1/2}

Ces propriétés sont à l'origine de réponses des parois que constituent les matériaux :

La Vitesse de transfert:

Le déphasage peut aussi être exprimé par la « vitesse de transfert » à travers le matériau:

$$v = 72,5 / (1/a)^{1/2}$$

v = vitesse de transfert (cm/h)

e = épaisseur de la paroi (m)

a = diffusivité (m²/h)

Logiquement, la vitesse de transfert de l'onde de chaleur à travers un matériau est proportionnelle à la diffusivité thermique de celui-ci.

La Profondeur de peau thermique:

La profondeur de peau thermique est la profondeur du matériau à laquelle l'amplitude de la variation de température est ramenée au 1/2,72ème de sa valeur initiale:

$$\delta = (2a/\omega)^{1/2}$$
$$\delta = (a.P/\pi)^{1/2}$$

δ = profondeur de peau thermique (m)

a = diffusivité thermique (m^2/h)

P = période de l'oscillation (h)

2 - Tableaux des propriétés thermiques des matériaux

Les matériaux sont classés dans les tableaux suivants en 5 classes :

- Bois et végétaux
- Isolants et plastiques
- Mortiers et plâtres
- Pierres et bétons
- Verres et métaux

Viennent ensuite les tableaux classant les matériaux par leur diffusivité et leur effusivité, toutes classes confondues, en ne retenant que les 25 premiers et les 25 derniers :

- Les 25 matériaux ayant la diffusivité thermique la plus faible (ordre croissant)
- Les 25 matériaux ayant la diffusivité thermique la plus élevée (ordre croissant)
- Les 25 matériaux ayant l'effusivité thermique la plus élevée (ordre décroissant)
- Les 25 matériaux ayant l'effusivité thermique la plus faible (ordre décroissant)

BOIS ET VEGETAUX										
Nom	Complément	Origine	λ	C	ρ	ρC	a	b	vt	δ
Bois léger	Tilleul bouleau	Aide-mémoire du thermicien 9° éd,	0,15	500	0,3	165	0,0009	4,8	2,2	0,083
	pin mélèze	1987 + doc "Stage chauffage au bois"								
Bois lourd	Chêne hêtre frêne	Aide-mémoire du thermicien - 9° éd,	0,2	650	0,7	436	0,0005	10,0	1,7	0,064
	arbres fruitiers	1987 + doc "Stage chauffage au bois"								
Bois très léger	Peuplier okoumé sapin	Aide-mémoire du thermicien 9° éd,	0,1	350	0,8	266	0,0005	5,6	1,5	0,059
	épicéa cèdre	1987 + doc "Stage chauffage au bois"								
Fibre de bois		Conception thermique de l'habitat	0,2	800	0,6	464	0,0003	8,3	1,3	0,050
		Ed EDISUD								
Linoléum naturel		L'isolation écologique	0,1	700	0,5	371	0,0002	5,5	1,1	0,041
		Ed Terres vivantes								
Panneau de particule bois		Conception thermique de l'habitat	0,2	800	0,6	464	0,0003	8,3	1,3	0,050
		Ed EDISUD								

Les Unités :

- λ : conductivité thermique = W /m.°C
 C : Masse volumique : kg/m³
 ρ : chaleur spécifique = Wh/kg.°C
 ρC : Chaleur volumique = Wh/m³.°C
 a : diffusivité thermique = m²/s ou m²/h
 b : effusivité thermique = Wh^{1/2}.m^{-1/2}.°C^{-1/2}
 VT : vitesse de transfert = cm/h
 δ : profondeur de peau thermique = m

ISOLANTS ET PLASTIQUES										
Nom	Complément	Origine	λ	C	ρ	ρC	a	b	vt	δ
Chênevotte	Chaleur spécifique estimée	Chanvrière de l'Aube	0,05	110	0,54	59	0,0008	1,7	2,1	0,079
Feutre bitumeux		Conception thermique de l'habitat Ed EDISUD	0,5	1700	0,28	476	0,0011	15,4	2,3	0,090
Fibre de cellulose	Chaleur spécifique estimée	Doc "CLIMACELL"	0,04	35	0,39	14	0,0029	0,7	3,9	0,150
Isochanvre		Chênevotte habitat	0,13	550	0,39	215	0,0006	5,3	1,8	0,068
Construction										
Laine de chanvre	Chanvrilaine en rouleaux	LCDA matériaux	0,04	25	0,39	10	0,0040	0,6	4,6	0,175
	Chaleur spécifique estimée									
Laine de mouton	Chaleur spécifique estimée	L'isolation écologique Ed Terre vivante	0,04	20	0,33	7	0,0061	0,5	5,6	0,215
Laine de roche	Fibres minérales	Règles ThK et "Aide-mémoire du thermicien" -9°ed- 1987	0,04	25	0,26	7	0,0063	0,5	5,8	0,220
Laine de verre	Fibres minérales	Conception thermique de l'habitat Ed EDISUD	0,04	12	0,23	3	0,0149	0,3	8,8	0,337
Ouate de cellulose	Chaleur spécifique estimée	Doc "HOMATHERM"	0,05	55	0,39	21	0,0021	1,0	3,3	0,127
Panneau de cellulose	Chaleur spécifique estimée	Doc "HOMATHERM"	0,04	100	0,39	39	0,0010	1,2	2,3	0,089
Panneau de liège		Doc "LIEGEXPAN" Aide-Mémoire du thermicien	0,04	120	0,39	47	0,0009	1,4	2,1	0,081
Polycarbonate		Aide-Mémoire du thermicien	0,23	1200	0,35	420	0,0005	9,8	1,7	0,065
Polystyrène	Matière plastique alvéolaire		0,04	18	0,39	7	0,0057	0,5	5,5	0,209
Polystyrène expansé	Matière plastique alvéolaire	Règles ThK et Conception Thermique de l'Habitat	0,04	25	0,38	10	0,0041	0,6	4,6	0,177
Polystyrène extrudé	Matière plastique alvéolaire	Règles ThK et catalogue Styrofoam	0,03	35	0,33	12	0,0025	0,6	3,6	0,138
Polyuréthane	Matière plastique alvéolaire	Règles ThK et Conception Thermique de l'Habitat	0,03	35	0,23	8	0,0037	0,5	4,4	0,169
PVC		Conception Thermique de l'Habitat	0,16	1379	0,28	386	0,0004	7,9	1,5	0,056
Verre cellulaire		Règles ThK et Conception Thermique de l'Habitat	0,05	130	0,23	30	0,0017	1,2	3,0	0,113

Les Unités :

- λ : conductivité thermique = W /m.°C
 C : Masse volumique : kg/m³
 ρ : chaleur spécifique = Wh/kg.°C
 ρC : Chaleur volumique = Wh/m³.°C
 a : diffusivité thermique = m²/s ou m²/h
 b : effusivité thermique = Wh^{1/2}m^{-1/2}.°C^{-1/2}
 VT : vitesse de transfert = cm/h
 δ : profondeur de peau thermique = m

MORTIERS ET PLATRES										
Nom	Complément	Origine	λ	C	ρ	ρC	a	b	vt	δ
Mortier		Pôle Construction	1,15	1950	0,23	449	0,0026	22,7	3,7	0,140
Sable sec		Pôle Construction	0,4	1800	0,22	396	0,0010	12,6	2,3	0,088
Enduit à la chaux	Chaleur spécifique estimée	L'isolation écologique	0,7	1400	0,28	392	0,0018	16,6	3,1	0,117
		Ed "Terre Vivante"								
Enduit extérieur		Aide-mémoire du thermicien	1,15	1700	0,28	476	0,0024	23,4	3,6	0,136
		9°ed- 1987								
Enduit plâtre		Conception Thermique de l'Habitat	0,35	1500	0,28	420	0,0008	12,1	2,1	0,080
Mortier		Aide-mémoire du thermicien	1,15	2000	0,23	460	0,0025	23,0	3,6	0,138
		9°ed- 1987								
Plâtre + cellulose		fermacell, doc	0,3	1200	0,22	264	0,0011	8,9	2,4	0,093
Plâtre + fibres minérales		Aide-mémoire du thermicien	0,3	1000	0,22	220	0,0014	8,1	2,7	0,102
		9°ed- 1987								
Plâtre courant		Aide-mémoire du thermicien	0,35	900	0,3	270	0,0013	9,7	2,6	0,100
		9°ed- 1987								
Plâtre gypse		Conception Thermique de l'Habitat	0,42	1200	0,23	276	0,0015	10,8	2,8	0,108

:

Les Unités :

- λ : conductivité thermique = W /m.°C
C : Masse volumique : kg/m³
 ρ : chaleur spécifique = Wh/kg.°C
 ρC : Chaleur volumique = Wh/m³.°C
a : diffusivité thermique = m²/s ou m²/h
b : effusivité thermique = Wh^{1/2}m^{-1/2}.°C^{-1/2}
VT : vitesse de transfert = cm/h
 δ : profondeur de peau thermique = m

PIERRES ET BETONS

Nom	Complément	Origine	λ	C	ρ	ρC	a	b	vt	δ
Adobe		Bâtiment Energie N° 21	0,53	2000	0,25	500	0,0011	16,3	2,4	0,090
Amiante ciment		Conception thermique de l'habitat	0,95	1800	0,29	522	0,0018	22,3	3,1	0,118
Ardoise		Aide-mémoire du thermicien 9 ^e ed -1987	2,1	2700	0,21	567	0,0037	34,5	4,4	0,168
Béton cellulaire 400	de 375 à 425 kg/m ³	Aide-mémoire du thermicien 9 ^e ed -1987	0,16	400	0,24	96	0,0017	3,9	3,0	0,113
Béton cellulaire 600	de 575 à 625 kg/m ³	Aide-mémoire du thermicien 9 ^e ed -1987	0,22	600	0,24	144	0,0015	5,6	2,8	0,108
Béton cellulaire 800	de 775 à 825 kg/m ³	Aide-mémoire du thermicien 9 ^e ed -1987	0,33	800	0,24	192	0,0017	8,0	3,0	0,115
Béton	Qualité B 160	Norme DIN 4108	1,51	2350	0,2	470	0,0032	26,6	4,1	0,156
Béton vibré		Norme DIN 4108	0,26	600	0,2	120	0,0022	5,6	3,4	0,129
Béton de chaux	Traité contre la vapeur	Norme DIN 4108	0,3	800	0,2	160	0,0019	6,9	3,1	0,120
Béton de chanvre	Chaleur spécifique estimée	Chanvrière de l'Aube	0,13	350	0,2	70	0,0019	3,0	3,1	0,119
Béton de copeaux de bois		Règles ThK pour la conduction et la masse volumique Estimat, de la chaleur massique	0,16	550	0,5	275	0,0006	6,6	1,7	0,067
Béton de fibres de bois	Fibragglos	Règles ThK pour la conduction et la masse volumique Estimation de la chaleur massique	0,12	400	0,5	200	0,0006	4,9	1,8	0,068
Béton laitier plein		Pôle Construction	1,4	2300	0,24	552	0,0025	27,8	3,7	0,139
Béton laitier caveux		Pôle Construction	0,7	1800	0,24	432	0,0016	17,4	2,9	0,111
Béton de pouzzolane	ou de laitier expansé de 1000 à 1650	Aide- mémoire du thermicien 9 ^e éd - 1987	0,35	1000	0,24	240	0,0015	9,2	2,8	0,106
Béton lourd	de granulats plein	Aide- mémoire du thermicien 9 ^e éd - 1987	0,52	1650	0,24	396	0,0013	14,3	2,6	0,100
Béton de granulats	caveux de 1650	Pôle Construction	1,75	2300	0,26	598	0,0029	32,3	3,9	0,150
Béton de granulats	à 2100	Pôle Construction	1,15	1650	0,24	396	0,0029	21,3	3,9	0,149
Agglo de béton	Creux 20cm	ASHRAE, Handbook of Fundamentals	1,4	2100	0,24	504	0,0028	26,6	3,8	0,146
Calcaire demi-ferme		Aide- mémoire du thermicien 9 ^e éd - 1987	1,15	1300	0,2	260	0,0044	17,3	4,8	0,184
Calcaire dur		Aide- mémoire du thermicien 9 ^e éd - 1987	1,4	1950	0,22	429	0,0033	24,5	4,1	0,158
Calcaire ferme		Aide- mémoire du thermicien 9 ^e éd - 1987	2,2	2400	0,22	528	0,0042	34,1	4,7	0,178
Calcaire tendre n°2		Aide- mémoire du thermicien 9 ^e éd - 1987	1,7	2200	0,22	484	0,0035	28,7	4,3	0,164
Calcaire tendre n°3		Aide- mémoire du thermicien 9 ^e éd - 1987	0,95	1500	0,22	330	0,0029	17,7	3,9	0,148
Carrelage		Aide- mémoire du thermicien 9 ^e éd - 1987	1,05	1700	0,22	374	0,0028	19,8	3,8	0,146
Granit	Pierre dure	Conception thermique de l'habitat	1,7	2300	0,19	437	0,0039	27,3	4,5	0,172
Grès		Aide- mémoire du thermicien 9 ^e éd - 1987	3	2600	0,19	494	0,0061	38,5	5,6	0,215
Marbre	Pierre calcaire	Règles ThK Aide mémoire du thermicien	1,01	1700	0,2	340	0,0030	18,5	4,0	0,151
Terre crue		Aide- mémoire du thermicien 9 ^e éd - 1987	2,4	2450	0,22	539	0,0045	36,0	4,8	0,184
Terre cuite	Tuiles,,,	Colzani	1,1	1800	0,23	414	0,0027	21,3	3,7	0,142
Brique 10cm		Aide- mémoire du thermicien 9 ^e éd - 1987	1,15	1900	0,25	475	0,0024	23,4	3,6	0,136
Brique perforée	Verticalement	ASHRAE, Handbook of Fundamentals	0,95	2000	0,2	400	0,0024	19,5	3,5	0,135
Brique pleine	Surfacée	Norme DIN 4108	0,6	1900	0,2	380	0,0016	15,1	2,9	0,110
Terre sèche	en sous-sol	Norme DIN 4108	0,34	1000	0,2	200	0,0017	8,2	3,0	0,114
Terre végétale		l'habitat écologique	0,58	1800	0,2	360	0,0016	14,4	2,9	0,111
		Aide- mémoire du thermicien 9 ^e éd - 1987	0,75	1500	0,25	375	0,0020	16,8	3,2	0,124
			1,26	1700	0,17	289	0,0044	19,1	4,8	0,183

VERRES ET METAUX										
Nom	Complément	Origine	λ	C	ρ	ρC	a	b	vt	δ
Acier		Aide-mémoire du thermicien 9 ^{ed} - 1987	52	7870	0,13	1023	0,0508	230,7	16,3	0,623
Acier Inox		Aide-mémoire du thermicien 9 ^{ed} - 1987	16	7900	0,14	1106	0,0145	133,0	8,7	0,332
Aluminium		Aide-mémoire du thermicien 9 ^{ed} - 1987	230	2700	0,25	675	0,3407	394,0	42,3	1,613
Cuivre		Aide-mémoire du thermicien 9 ^{ed} - 1987	380	8930	0,11	982	0,3868	611,0	45,1	1,719
Eau à 20°C		Aide-mémoire du thermicien 9 ^{ed} - 1987	0,6	1000	1,16	1160	0,0005	26,4	1,6	0,063
Métal ferreux		Conception Thermique de l'Habitat	150	8900	0,12	1068	0,1404	400,2	27,2	1,036
Verre plat		Aide-mémoire du thermicien 9 ^{ed} - 1987	1,16	2490	0,23	573	0,0020	25,8	3,3	0,124
Verre cellulaire		Norme DIN 4108	0,04	144	0,2	29	0,0014	1,1	2,7	0,103
Fibre de verre		ASHRAE, Handbook of Fundamentals	0,02	116	0,42	49	0,0004	1,0	1,5	0,056
Zinc		Aide-mémoire du thermicien 9 ^{ed} - 1987	112	7130	0,11	784	0,1428	296,4	27,4	1,044

Les Unités :

λ : conductivité thermique = W /m.°C

C : Masse volumique : kg/m³

ρ : chaleur spécifique = Wh/kg.°C

ρC : Chaleur volumique = Wh/m³.°C

a : diffusivité thermique = m²/s ou m²/h

b : effusivité thermique = Wh^{1/2} m^{-1/2} .°C^{-1/2}

VT : vitesse de transfert = cm/h

δ : profondeur de peau thermique = m

Les 25 matériaux ayant la diffusivité thermique la plus faible (ordre croissant)

Nom	λ	C	ρ	ρC	a	b	vt	δ
Linoléum naturel	0,081	700	0,53	371	0,00022	5,482	1,07	0,04
Fibre de bois	0,15	800	0,58	464	0,00032	8,343	1,30	0,05
Panneau de particule bois	0,15	800	0,58	464	0,00032	8,343	1,30	0,05
Fibre de verre	0,02	116	0,42	48,72	0,00041	0,987	1,47	0,06
PVC	0,16	1379	0,28	386,12	0,00041	7,860	1,48	0,06
Bois très léger	0,12	350	0,76	266	0,00045	5,650	1,54	0,06
Eau à 20°C	0,6	1000	1,16	1160	0,00052	26,382	1,65	0,06
Bois lourd	0,23	650	0,67	435,5	0,00053	10,008	1,67	0,06
Polycarbonate	0,23	1200	0,35	420	0,00055	9,829	1,70	0,06
Béton de copeaux de bois	0,16	550	0,5	275	0,00058	6,633	1,75	0,07
Béton de fibre de bois	0,12	400	0,5	200	0,00060	4,899	1,78	0,07
Isochanvre construction	0,13	550	0,39	214,5	0,00061	5,281	1,78	0,07
Chênevotte	0,048	110	0,54	59,4	0,00081	1,689	2,06	0,08
Enduit plâtre	0,35	1500	0,28	420	0,00083	12,124	2,09	0,08
Panneau de liège	0,04	120	0,39	46,8	0,00085	1,368	2,12	0,08
Bois léger	0,15	500	0,33	165	0,00091	4,750	2,19	0,08
Sable sec	0,4	1800	0,22	396	0,00101	12,586	2,30	0,09
Panneau de cellulose	0,04	100	0,39	39	0,00103	1,249	2,32	0,09
Feutre bitumeux	0,5	1700	0,28	476	0,00105	15,427	2,35	0,09
Adobe	0,53	2000	0,25	500	0,00106	16,279	2,36	0,09
Plâtre + cellulose	0,3	1200	0,22	264	0,00114	8,899	2,44	0,09
Plâtre courant	0,35	900	0,3	270	0,00130	9,721	2,61	0,10
pouzzolane	0,52	1650	0,24	396	0,00131	14,350	2,63	0,10
Plâtre + fibres minérales	0,3	1000	0,22	220	0,00136	8,124	2,68	0,10
Verre cellulaire	0,04	144	0,2	28,8	0,00139	1,073	2,70	0,10

De la série des 81 matériaux classés, nous extrayons les **25 moins diffusifs** et les **25 plus diffusifs** ainsi que les **25 plus effusifs** et les **25 moins effusifs**. Il y a donc 31 matériaux non classés dans les tableaux qui suivent.

La liste des **25 matériaux moins diffusifs** fait apparaître les matériaux à base de bois (fibre de bois puis bois léger) ou de végétaux (isochanvre, liège). A noter aussi la présence du plâtre et, c'est plus surprenant, de l'adobe.

Les valeurs des vitesses de transfert (**Vt**) et de la profondeur de peau thermique (δ) donnent le même ordre de matériaux. C'est normal puisque ces deux grandeurs ne dépendent que de la diffusivité. Dans cette série, la vitesse de transfert est toujours $< 2,7\text{cm/h}$ et la profondeur de peau thermique $< 0,10\text{m}$.

Les 25 matériaux ayant la diffusivité thermique la plus élevée (ordre croissant)

Nom	λ	C	ρ	ρC	a	b	vt	δ
Fibre de cellulose	0,04	35	0,39	13,65	0,00293	0,739	3,92	0,15
Grès	1,01	1700	0,2	340	0,00297	18,531	3,95	0,15
Béton	1,505	2350	0,2	470	0,00320	26,596	4,10	0,16
Calcaire demi-ferme	1,4	1950	0,22	429	0,00326	24,507	4,14	0,16
Calcaire ferme	1,7	2200	0,22	484	0,00351	28,684	4,30	0,16
Ardoise	2,1	2700	0,21	567	0,00370	34,507	4,41	0,17
Polyuréthane	0,03	35	0,23	8,05	0,00373	0,491	4,43	0,17
Carrelage	1,7	2300	0,19	437	0,00389	27,256	4,52	0,17
Laine de chanvre	0,039	25	0,39	9,75	0,00400	0,617	4,59	0,17
Polystyrène expansé	0,039	25	0,38	9,5	0,00411	0,609	4,65	0,18
Calcaire dur	2,2	2400	0,22	528	0,00417	34,082	4,68	0,18
Terre végétale	1,26	1700	0,17	289	0,00436	19,082	4,79	0,18
Agglo de béton	1,15	1300	0,2	260	0,00442	17,292	4,82	0,18
Marbre	2,4	2450	0,22	539	0,00445	35,967	4,84	0,18
Polystyrène	0,04	18	0,39	7,02	0,00570	0,530	5,47	0,21
Laine de mouton	0,04	20	0,33	6,6	0,00606	0,514	5,64	0,22
Granit	3	2600	0,19	494	0,00607	38,497	5,65	0,22
Laine de roche	0,041	25	0,26	6,5	0,00631	0,516	5,76	0,22
Acier Inox	16	7900	0,14	1106	0,01447	133,026	8,72	0,33
Laine de verre	0,041	12	0,23	2,76	0,01486	0,336	8,84	0,34
Acier	52	7870	0,13	1023,1	0,05083	230,654	16,34	0,62
Métal ferreux	150	8900	0,12	1068	0,14045	400,250	27,17	1,04
Zinc	112	7130	0,11	784,3	0,14280	296,381	27,40	1,04
Aluminium	230	2700	0,25	675	0,34074	394,018	42,32	1,61
Cuivre	380	8930	0,11	982,3	0,38685	610,962	45,09	1,72

La liste des **25 matériaux plus diffusifs** fait apparaître des matériaux de caractéristiques très hétéroclites : béton et polystyrène coexistent (!). A noter aussi la présence des métaux tout en haut de la hiérarchie.

Dans cette série, la vitesse de transfert est toujours $> 3,92$ cm/h (45cm/h pour le cuivre !) et la profondeur de peau thermique $> 0,15$ m (1,72m pour le cuivre).

Les 25 matériaux ayant l'effusivité thermique la plus élevée (ordre décroissant)

Nom	λ	C	ρ	ρC	a	b	vt	δ
Cuivre	380	8930	0,11	982,3	0,38685	610,96	45,09	1,72
Métal ferreux	150	8900	0,12	1068	0,14045	400,25	27,17	1,04
Aluminium	230	2700	0,25	675	0,34074	394,02	42,32	1,61
Zinc	112	7130	0,11	784,3	0,14280	296,38	27,40	1,04
Acier	52	7870	0,13	1023,1	0,05083	230,65	16,34	0,62
Acier Inox	16	7900	0,14	1106	0,01447	133,03	8,72	0,33
Granit	3	2600	0,19	494	0,00607	38,50	5,65	0,22
Marbre	2,4	2450	0,22	539	0,00445	35,97	4,84	0,18
Ardoise	2,1	2700	0,21	567	0,00370	34,51	4,41	0,17
Calcaire dur	2,2	2400	0,22	528	0,00417	34,08	4,68	0,18
Béton lourd	1,75	2300	0,26	598	0,00293	32,35	3,92	0,15
Calcaire ferme	1,7	2200	0,22	484	0,00351	28,68	4,30	0,16
Béton laitier plein	1,4	2300	0,24	552	0,00254	27,80	3,65	0,14
Carrelage	1,7	2300	0,19	437	0,00389	27,26	4,52	0,17
Béton	1,505	2350	0,2	470	0,00320	26,60	4,10	0,16
Béton de granulats	1,4	2100	0,24	504	0,00278	26,56	3,82	0,15
Eau à 20°C	0,6	1000	1,16	1160	0,00052	26,38	1,65	0,06
Verre plat	1,16	2490	0,23	572,7	0,00203	25,77	3,26	0,12
Calcaire demi-ferme	1,4	1950	0,22	429	0,00326	24,51	4,14	0,16
Enduit extérieur	1,15	1700	0,28	476	0,00242	23,40	3,56	0,14
Terre cuite	1,15	1900	0,25	475	0,00242	23,37	3,57	0,14
Mortier	1,15	2000	0,23	460	0,00250	23,00	3,63	0,14
Mortier	1,15	1950	0,23	448,5	0,00256	22,71	3,67	0,14
Amiante ciment	0,95	1800	0,29	522	0,00182	22,27	3,09	0,12
Terre crue	1,1	1800	0,23	414	0,00266	21,34	3,74	0,14
Béton de granulats	1,15	1650	0,24	396	0,00290	21,34	3,91	0,15

La liste des **25 matériaux plus effusifs** place en tête des métaux. Les matériaux de maçonnerie y figurent (béton, pierre, terre crue).

Dans cette série, la vitesse de transfert et la profondeur de peau thermique sont en ordre plus dispersé mais il a bien une tendance à la diminution quand l'effusivité diminue.

Les 25 matériaux ayant l'effusivité thermique la plus faible (ordre décroissant)

Nom	λ	C	ρ	ρC	a	b	vt	δ
Béton de copeaux de bois	0,16	550	0,5	275	0,00058	6,63	1,75	0,07
Bois très léger	0,12	350	0,76	266	0,00045	5,65	1,54	0,06
Béton cellulaire 600	0,22	600	0,24	144	0,00153	5,63	2,83	0,11
Béton vibré	0,26	600	0,2	120	0,00217	5,59	3,37	0,13
Linoléum naturel	0,081	700	0,53	371	0,00022	5,48	1,07	0,04
Isochanvre construction	0,13	550	0,39	214,5	0,00061	5,28	1,78	0,07
Béton de fibre de bois	0,12	400	0,5	200	0,00060	4,90	1,78	0,07
Bois léger	0,15	500	0,33	165	0,00091	4,75	2,19	0,08
Béton cellulaire 400	0,16	400	0,24	96	0,00167	3,92	2,96	0,11
Béton de chanvre	0,13	350	0,2	70	0,00186	3,02	3,12	0,12
Chênevotte	0,048	110	0,54	59,4	0,00081	1,69	2,06	0,08
Panneau de liège	0,04	120	0,39	46,8	0,00085	1,37	2,12	0,08
Panneau de cellulose	0,04	100	0,39	39	0,00103	1,25	2,32	0,09
Verre cellulaire	0,05	130	0,23	29,9	0,00167	1,22	2,96	0,11
Verre cellulaire	0,04	144	0,2	28,8	0,00139	1,07	2,70	0,10
Fibre de verre	0,02	116	0,42	48,72	0,00041	0,99	1,47	0,06
Ouate de cellulose	0,045	55	0,39	21,45	0,00210	0,98	3,32	0,13
Fibre de cellulose	0,04	35	0,39	13,65	0,00293	0,74	3,92	0,15
Laine de chanvre	0,039	25	0,39	9,75	0,00400	0,62	4,59	0,17
Polystyrène expansé	0,039	25	0,38	9,5	0,00411	0,61	4,65	0,18
Polystyrène extrudé	0,029	35	0,33	11,55	0,00251	0,58	3,63	0,14
Polystyrène	0,04	18	0,39	7,02	0,00570	0,53	5,47	0,21
Laine de roche	0,041	25	0,26	6,5	0,00631	0,52	5,76	0,22
Laine de mouton	0,04	20	0,33	6,6	0,00606	0,51	5,64	0,22
Polyuréthane	0,03	35	0,23	8,05	0,00373	0,49	4,43	0,17
Laine de verre	0,041	12	0,23	2,76	0,01486	0,34	8,84	0,34

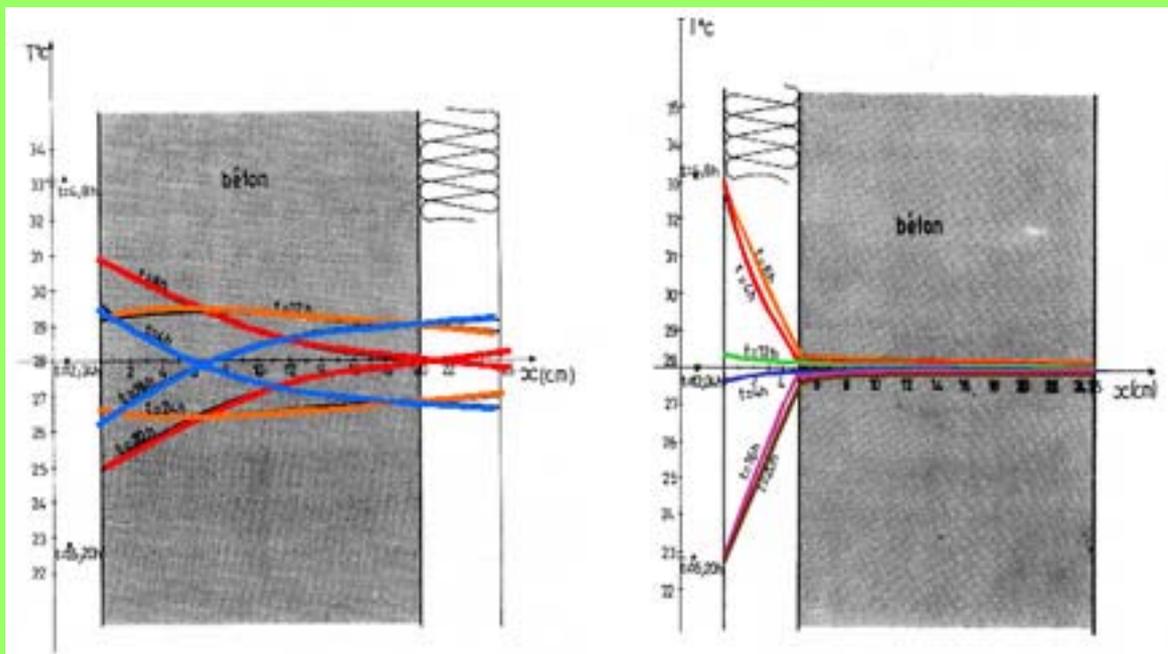
La liste des **25 matériaux moins effusifs** fait apparaître les matériaux à base de bois dont il faut signaler cependant qu'ils sont mieux placés que les isolants purs (laine de verre ou polystyrène) : leur effusivité est en effet près de 10 fois plus grande.

Curieusement, la vitesse de transfert et la profondeur de peau thermique connaissent une tendance à l'augmentation (notamment dans les isolants) alors que l'effusivité continue à diminuer.

Addition de matériaux : quel positionnement ?

Une question est souvent posée en cas de recours à deux matériaux, l'un plutôt effusif et l'autre isolant thermique : « où placer l'isolation thermique, à l'extérieur ou à l'intérieur ? ». La réponse nécessite quelques réflexions sur le destin des flux thermiques à travers les deux couches mitoyennes.

D'abord, il faut distinguer entre les oscillations thermiques provenant de l'extérieur et celles qui viennent de l'intérieur du bâtiment (les deux inerties : « de transmission » et « par absorption »).



A

B

Profils d'amplitudes sous l'effet d'une sollicitation extérieure à l'intérieur des murs toutes les 4 heures pour les deux positions de l'isolant : A = Isolant intérieur ; B = Isolant extérieur ; (d'après Pierre LAVIGNE).

Oscillations extérieures :

Cas de l'isolation intérieure (A) : dans le matériau effusif (béton) en position extérieure, l'amplitude de l'oscillation décroît avec la profondeur et à l'interface avec l'isolant, la température du matériau effusif s'impose ; l'amplitude continue à diminuer à travers l'isolant qui a la même diffusivité que le béton.

Cas de l'isolation extérieure (B) : le matériau effusif (béton) en position intérieure crée un « appel de chaleur » venant de la couche extérieure et à l'interface, comme c'est le matériau effusif qui impose sa température, il y a une chute brutale dans les profils d'amplitudes à travers l'isolant. Au bout du compte, l'amplitude coté intérieur est inférieure à celle du cas précédent. Cette solution est donc préférable.

Oscillations d'origine intérieure :

Cette circonstance, due rappelons-le à l'intermittence des apports internes ou à celle d'apports solaires non contrôlés, est plus facile à traiter : ici l'effusivité joue un rôle capital ; par conséquent la solution de l'isolant extérieur est plus intéressante. La question que l'on peut se poser est « **dans quelle proportion ?** ».

Tout dépend de la présence d'autres parois effusives à l'intérieur du bâtiment : planchers bas et haut, cloisonnements lourds. Si ces parois, qui présentent en général une surface d'échange considérable, sont effusives, l'ajout d'effusivité par la façade a un effet négligeable. Dans ce cas, il est possible de proposer une façade légère dont les fonctions principales soient l'isolation thermique et le contrôle de l'ensoleillement, en utilisant du bois par exemple.

Le cas des matériaux creux ou alvéolaires

Le calcul de la diffusivité et de l'effusivité thermiques des matériaux creux est très difficile et il y a peu d'informations sur ce thème.

Pierre Lavigne considère que l'on peut raisonner à partir des **valeurs équivalentes** de la conductivité thermique λ et de la chaleur volumique ρC . Il observe alors ceci :

Pour les matériaux creux :

- La **conductivité équivalente λ décroît** nécessairement avec la présence de l'air.
- La **chaleur volumique équivalente ρC** subit elle aussi une **diminution**: la présence de l'air réduit la capacité à absorber la chaleur.

Il résulte de cela que :

- **La diffusivité équivalente a évolue sans doute peu** puisque λ et ρC sont susceptibles de diminuer simultanément, mais on ne sait pas dans quelle proportion puisque ces deux diminutions sont indépendantes.
- **L'effusivité équivalente b subit certainement une diminution**, puisque c 'est le produit de deux grandeurs qui diminuent toutes les deux.

L'utilisation de matériaux creux n'affecte probablement pas l'inertie de transmission du bâtiment, mais réduit certainement l'inertie par absorption. Construire en **Monomur** paraît donc une solution discutable en terme d'inertie par absorption, mais ces matériaux étant utilisés essentiellement en enveloppe extérieure (façades), cela n'a d'influence néfaste qu'en cas de planchers et cloisonnements internes dépourvus d'effusivité, ce qui est rarement le cas lorsqu'on construit avec des Monomurs.

Récapitulons...

Choisir un matériau pour obtenir des effets de l'inertie thermique, c'est :

A - Pour augmenter l'inertie de transmission :

Il faut **diminuer la diffusivité** du matériau ; pour cela deux moyens :

- Diminuer la conductivité thermique λ .
- Augmenter l'épaisseur de mise en œuvre du matériau.

En théorie, on pourrait aussi augmenter la chaleur volumique ρC , c'est à dire augmenter ρ la chaleur spécifique et augmenter C la masse volumique. Mais cela est contradictoire avec ce qui précède du fait de la loi de proportionnalité qui lie la conductivité et la masse volumique.

B - Pour augmenter l'inertie par absorption :

Il faut **augmenter l'effusivité** du matériau ; pour cela il y a lieu de distinguer deux positions :

B1 - En façade, il y a trois moyens :

- Augmenter la conductivité thermique λ .
- Augmenter la chaleur volumique ρC , c'est à dire augmenter ρ la chaleur spécifique, augmenter C la masse volumique.
- Positionner la paroi isolante à l'extérieur de manière à conserver la couche effusive à l'intérieur.

B2 - En parois internes (planchers et cloisonnements), il y a trois moyens :

- Augmenter la conductivité thermique λ .
- Augmenter la chaleur volumique ρC , c'est à dire augmenter ρ la chaleur spécifique, augmenter C la masse volumique.
- Augmenter la surface d'échange entre les matériaux effusifs et l'ambiance intérieure.

Les surfaces potentiellement mises en œuvre étant plus importantes pour les parois internes que pour la parties opaques des façades, c'est l'effusivité des premières qu'il faut viser en priorité. Les façades peuvent alors être dotées plutôt de **l'inertie de transmission**.

3 - Bibliographie

Pierre LAVIGNE en collaboration avec Paul BREJON et Pierre FERNANDEZ, « *Architecture climatique, une contribution au développement durable* », tome 1 : Bases physiques ; EDISUD, Aix-en-Provence. 1997.

Ouvrage très détaillé sur la question de l'inertie thermique du bâtiment avec un usage clair des analogies hydrauliques. La référence dans le domaine.

« *L'inertie thermique dans la conception* », Pôle Construction, Montpellier. Mai 2003.

L'une des communications au colloque « L'inertie en climat méditerranéen » du 15 mai 2003 à Montpellier.