

# ENERGIDE

Nature - Science - Construction

Montjuvin 43200 LAPTE Téléphone : 33(0)4 71 59 39 48 Télécopie : 33(0)4 71 59 30 50

Courriel : [energide@wanadoo.fr](mailto:energide@wanadoo.fr) – Site : [www.energide.eu](http://www.energide.eu)

La théorie  
de la  
transmission de chaleur  
et les  
matériaux de construction  
du  
bâtiment.

## **1. PRESENTATION.**

Le présent document est consacré à l'exposé de la méthode de calcul et aux résultats que l'on obtient en appliquant (correctement on l'espère en attendant les critiques) une des théories de la transmission de chaleur dite souvent « loi des caves » aux matériaux structurels et isolants de la construction de bâtiments.

Si les matériaux de construction et d'isolation modernes ont d'excellentes performances du point de vue de la protection contre les froidures hivernales, ils sont souvent décevants, l'été venu, pour nous protéger de la chaleur extérieure sans climatisation. On connaît bien leurs caractéristiques conductives en régime stationnaire et l'on sait établir la valeur du flux d'énergie traversant une épaisseur donnée pour une différence de température donnée. L'été, si aucun générateur interne ne « produit » du froid une isolation pourtant performante l'hiver en présence d'un flux d'énergie, ne sert à rien. On fait un pas en comprenant que lors d'une période de grande chaleur, il existe des instants dans la journée de 24 heures, par exemple au petit matin, où la chaleur est moins intense qu'à 14 heures, c'est à dire à midi. D'où l'idée de donner aux constructions des inerties thermiques propres à lisser, à amortir, les pointes de chaleur. C'est donc surtout sur la question du confort d'été que porte ici notre attention.

Depuis quelques temps on entend sourdre l'idée que pour avoir une certaine inertie thermique, les matériaux de construction doivent être lourds, sous prétexte que leurs chaleurs massiques sont toutes comparables. On entend dire aussi, par exemple, que si tel isolant n'est pas très performant l'été, il suffit de l'accompagner dans la construction de bonnes dalles de béton qui feront le travail. Ceci n'est pas faux mais n'est pas propre à nous convaincre!

On voit bien aussi que les chaleurs massiques des matériaux sont assez variées et d'ailleurs assez confidentielles, leurs masses volumiques, bien mieux connues, différent également beaucoup, et il existe une large gamme de conductivités dans la famille. La simplification par la « lourdeur » est donc un peu courte et donne à réfléchir.

Ceci dit, heureusement, çà et là, en ordre fort dispersé, des auteurs parfois occasionnels, dans des articles, des livres, des pages internet, évoquent l'idée que l'on pourrait regarder un peu scientifiquement ce qu'il en est en utilisant les résultats des théories de la transmission de chaleur. Il n'est pas douteux que dans les pays anglo-saxons ou du nord est de l'Europe une démarche comparable a déjà été faite avec rigueur, les traces en sont très visibles, mais les détails nous sont inconnus, on ne les a pas assez cherchés. Chez nous, force est de constater que la RT2000 (CSTB) restait en retrait de l'étude scientifique du problème alors que la RT2005, tardive ne fait qu'en dire un peu plus. (cela va mieux avec RT 2012)

La Science dite de la « transmission de chaleur » est une discipline ardue qui trouve ses applications dans les machines thermiques. On y envisage des transmissions de chaleur en régime stationnaire mais aussi en régimes diversement variés du fait que ces machines sont souvent alternatives ou tournantes (moteurs, turbines). Les matériaux sur lesquels la littérature s'arrête un peu sont ceux de la construction mécanique, mais qu'importe.

Les ouvrages que l'on a trouvés traitent de cas très particuliers : ceci est dû au fait que la résolution des équations décrivant le problème n'est pas toujours possible. Dans certains cas intermédiaires des méthodes graphiques ou par éléments finis existent.

Ce que l'on peut lire dans les quelques documents précurseurs (surtout à l'étranger) qui nous orientent vers la transmission de chaleur est pour le moins disparate et surtout manque de rigueur sur le plan de la Physique en jonglant avec les unités, voir avec les dimensions des variables et met souvent les poireaux dans le même panier que les carottes pour les compter. On trouve aussi des théories encore plus tronquées que celle que l'on va évoquer, n'allant comme elle pas assez loin bien sûr mais pas aussi loin non plus et souvent sans que leurs auteurs ne conçoivent aucune espèce d'humilité comparable à celle que l'on déclare à présent devant l'infinité de ce que comme nous ils oublient pour ne pas le comprendre.

Nous n'avons rien trouvé qui soit le résultat d'expériences précises, sauf qu'il existe des méthodes de construction largement pratiquées à l'étranger qui tiennent compte de façon certaine des phénomènes mis en lumière ici.

L'idée générale dans toutes ces démarches est de regarder ce peut nous apporter la variation journalière de température pour arriver avec un choix judicieux de matériaux à modérer les effets des grandes chaleurs sur l'atmosphère intérieure de nos maisons, les mêmes matériaux devant être les plus performants qui soient l'hiver lorsque la question n'est plus simplement le confort mais devient celle de l'énergie.

On se place donc dans la seule idée de **comparer** entre eux, du point de vue de leur comportement devant une sollicitation en température variable dans le temps, les matériaux de construction structurelle et d'isolation, en tenant compte toujours de leurs facultés à nous isoler du froid l'hiver.

Pour cela et comme il ne s'agit que de comparer, en dehors de toute démarche déterministe, des matériaux existants, disponibles, pouvant être considérés comme plus ou moins convenables selon les critères choisis par ailleurs, on tente ici de les regarder se comporter en fonction d'une théorie très poétique de la transmission de chaleur qui porte parfois le nom de « loi des caves ».

La loi des caves considère une variation de température extérieure approchée par une loi sinusoïdale par rapport au temps de période **annuelle** et d'amplitude donnée. On en attend, pour toute profondeur d'un point dans le sol les deux résultats suivants :

- la température en ce point, repéré par sa profondeur, à l'instant  $t$ ,
- l'amplitude de variation de cette température en ce même point mesurée en proportion de l'amplitude en surface.

Pour appliquer cette loi, on suppose que la surface du sol est plane et infinie en toutes directions, que le sol a une profondeur infinie également, qu'il est constitué d'une matière unique, homogène, isotrope, et que comme on l'a dit la variation de la température (en l'absence de tout rayonnement solaire direct) suit une loi de variation par rapport au temps de type sinusoïdal de période annuelle et d'amplitude fixe. On suppose aussi que cette situation perdure !

Tout cela est faux. La terre est ronde et finie, la courbe de température ressemble aux montagnes russes, la terre est un mélange imprévisible de choses diverses, etc.

Pourtant, pourtant, notre vin qui craint hautement les variations de température ainsi que les températures élevées se conserve dans nos caves d'autant mieux quelles sont profondes et voûtées (là-dessus réfléchissons un peu, c'est de la géométrie) et malgré tous les mensonges proférés plus haut, ceci est bien vrai et la loi des caves le dit sans dégustation.

Nous allons appliquer aux matériaux étudiés, de façon aussi scabreuse et approximative, la même théorie. Comme tous les matériaux vont passer dans la même moulinette de calcul, la conclusion que l'on pourra tirer est purement comparative.

Si nous observons les variations estivales de température dans une forte maison de pierre, disons en granit, nous sommes toujours surpris de la fraîcheur qui y règne. Les maisons de granit sont en réalité construites avec un parement extérieur, un parement intérieur et un certain remplissage de terres diverses et de pierres en petits éléments. On pense souvent à juste raison que ces parties se sont chargées d'humidité dans l'hiver, laquelle s'évapore en créant du froid l'été. Bien réel ce phénomène a des limites dans le temps et en fin d'été les maisons de pierre sont encore très fraîches comparées aux autres, même les plus isolées.

Les calculs qui sont présentés ci-après ont été faits dans cette posture intellectuelle là, ils ont une valeur comparative, d'abord entre eux et encore à la lumière de nos expériences domestiques ; mais ils ne déterminent rien.

Guidés par ces résultats qui font une sélection des matériaux les plus performants pour l'été et l'hiver, il conviendrait de réaliser des expériences instrumentées et précises sur échantillons et sur projets réels.

Notons encore que l'inertie obtenue dans les épaisseurs de matériaux joue bien l'été pour nous donner des maisons fraîches, mais joue aussi l'hiver pour effacer ou reporter avec une forte atténuation les pointes de froid du matin par exemple.

Nous ne dirons rien de plus que le peu bien trop neutre qui va suivre dans ce texte au sujet des autres caractéristiques constructives des matériaux évoqués. Ce que l'on est en devoir en effet de regarder dans les matériaux constructifs pour les choisir, c'est aussi entre autres le coût énergétique de leur élaboration, de leur transport, l'ergonomie et la dépense en main d'œuvre de leur mise en œuvre, leur impact sur la santé lors de la construction, à l'usage et lors de leur destruction, leur recyclage ultérieur, leur résistance à la corrosion en service, leur perméabilité à la vapeur d'eau, leur beauté...

Il faut donner à la réflexion du lecteur ceci : rien ne sera dit, en attendant, des flux réels d'énergie qui traversent la paroi pendant l'expérience. A tout instant ces flux sont ceux de la théorie purement conductive habituelle. Il y a encore là une certaine désinvolture de la part des auteurs qu'il faut noter. Considérons de façon provisoire que nous admettons une possibilité d'addition et de superposition pures et simples des phénomènes étudiés séparément et disons que rien ne sera mieux que des essais réels à l'instrumentation bien complexe ou encore mieux que des expériences constructives complètes où de beaux enfants dormiront sagement dans la fraîcheur des nuits d'été.

Nous devons aussi dire que les auteurs se donnent pour devoir d'imaginer des procédés de construction simples et de grandes qualités énergétiques en amont comme en aval dans le cadre d'une optimisation des coûts faisant appel à l'auto-construction assistée...

Willy Besset, gérant, Ingénieur A et M.

## 2. LA METHODE DE CALCUL PROPOSEE.

Nous supposons que nous disposons d'une épaisseur infinie du matériau étudié limitant dans l'espace deux domaines :

- d'un côté, ce que nous appellerons l'extérieur, qui est de l'air immobile sans rayonnement aucun,
- de l'autre ce que nous appellerons l'intérieur qui est la masse d'épaisseur infinie du matériau.

Cette disposition s'appelle le « mur semi-infini ».

A l'extérieur nous faisons varier la température homogène dans tout l'espace selon une loi sinusoïdale du temps caractérisée par :

- une période égale à 24 heures de sorte que la pulsation  $\omega$  ait une valeur de  $2\pi/24 \times 3600$ , le temps  $t$  étant exprimé en secondes, (des calculs comparables pourraient être envisagés avec des périodes différentes)
- une amplitude  $\Delta T$  telle que la loi de variation puisse en fait s'écrire  $T = T_0 + \Delta T \cos(\omega t)$ ,  $T_0$  étant la température moyenne.

Cette situation est assez différente de celle que l'on trouve dans la réalité. Il est précisé dans la littérature que cette méthode du mur semi infini n'est pas si fautive que cela et que ses résultats seront assez proches de ceux qui seraient obtenus en considérant un mur d'épaisseur donnée pour lequel les calculs sont bien plus compliqués.

Nous cherchons à calculer quelle est à chaque instant la température qui règne à l'**intérieur** de la masse infinie à une profondeur «  $e$  » mesurée depuis la surface extérieure. (ce n'est donc pas exactement celle de la surface intérieure imaginée !)

Comme cette température est également une fonction du temps, et que celle-ci est sinusoïdale de même pulsation, elle est entièrement définie par les données suivantes :

- son **déphasage** par rapport à la loi d'origine, cette quantité est un angle en radians, sans dimension,
- son **amplitude** mesurée à l'aune de l'amplitude de la loi de température extérieure, le résultat est nommé **atténuation** et comme il est un rapport de deux températures il est également sans dimension.

Passons sur l'inextricable résolution de l'équation différentielle qui traduit l'expérience et avançons les deux résultats :

**Le Déphasage horaire :  $D = e \cdot I_J \cdot 24/2\pi$**

**L'Atténuation (rapport des amplitudes) :  $A = \exp(-e \cdot I_J)$**

Dans ces deux résultats figure un terme identique  $I_J$  qui semble donc très caractéristique du matériau . Comme la littérature ne lui donne pas de nom, nous en avons inventé un qui se justifie comme ceci :

-le Déphasage horaire augmente avec  $I_J$  puisqu'il est simplement le produit de  $I_J$  par l'épaisseur (la profondeur !), nous avons intérêt du point de vue de nos objectifs à ce que ce nombre  $I_J$  (dont la dimension est l'inverse d'une longueur alors que  $e \cdot I_J$  est un angle en radians) soit le plus grand possible...

- l'Atténuation diminue quand  $I_J$  augmente car elle est l'inverse de l'exponentielle du déphasage angulaire  $e \cdot I_J$  lui-même. Comme l'atténuation est le nombre par lequel on multiplie l'amplitude extérieure pour calculer l'amplitude intérieure on a ici intérêt à ce que ce nombre soit le plus petit possible, donc encore à ce que  $I_J$  soit le plus grand possible.

-  $I_J$  est défini pour une pulsation de la fonction de température extérieure  $\omega$  telle que la période soit de 24 heures et donc :

### $I_J$ est nommé ici : Inersivité journalière.

Nous pourrions comparer cette valeur qui ne caractérise que le matériau dans les tableaux de calcul, par exemple en voyant que  $I_J = 14,4$  pour le liège expansé et 5,09 pour la mousse de polyuréthane.

Le tableau brossé est le suivant :

La chaleur (température ici) extérieure de pointe arrive à la profondeur « e » (que l'on prend pour une épaisseur et vice versa) avec un retard dans le temps qui est exprimé par le déphasage horaire, produit d'un angle de déphasage ( $eI_J$ ) par  $24/2\pi$ ,

L'amplitude de la variation imposée à l'extérieur, en ce point, est multipliée par le nombre  $A$  plus petit que 1 et donc l'amplitude intérieure est plus faible. On suppose, les choses étant établies que cette nouvelle amplitude est à compter de part et d'autre de la température « efficace » ou disons « moyenne » de l'extérieur :  $T_o$ .

Comment avons nous trouvé cette quantité ?

La théorie, qui n'a aucune raison de le faire dans les applications industrielles, n'isole pas plus quelle ne nomme  $I_{Jj}$  qui est obtenu par la formule suivante :

$$I_J = (\omega/2.a)^{1/2} \quad (m^{-1})$$

Les commentaires à faire sur cette expression sont les suivants :

- l'exposant  $1/2$  désigne la racine carrée.

-  $\omega$  est la pulsation dont la valeur est donnée plus haut de la fonction de température extérieure imposée,

-  $a$  est on ne peut plus joli, c'est ce que les scientifiques appellent la **diffusivité**.

En effet au cours du calcul que l'on n'a pas vu, il a été utile d'isoler et de nommer cette quantité qui est fort prosaïque, mais assez bien caractéristique du matériau et qui s'écrit :

$$a = \lambda / \rho.C \quad (m^2/s)$$

Nous somme là en terrain connu :

-  $\lambda$  est la bonne vieille **conductivité thermique** du matériau (en W/m.°C)

-  $\rho$  est la **masse volumique** du matériau (en Kg/m<sup>3</sup>)

-  $C$  est la **chaleur massique** du matériau (en J/Kg.°C) (la chose confidentielle ! et inconnue de la RT2000)

Cette dernière désigne la quantité de chaleur qu'il faut apporter à 1 kg de notre matériau pour que sa température s'élève de 1°C. Cette donnée est assez inconnue en général pour les matériaux de construction : elle est contestable pour les mélanges et pour les matériaux non continus...

Comme le terme  $I_J$  comporte  $a$  au dénominateur, la pulsation étant constante ici et le tout étant sous racine on a tout intérêt à ce que  $a$  soit le plus petit possible puisque que l'on cherche à avoir  $I_J$  le plus grand possible.

Nous sommes à cet égard de toutes façons bien servis car  $a$  est de l'ordre de  $10^{-8}$  avec comme facteur 60 pour la mousse de polyuréthane et 17 seulement pour le liège expansé.

Le décor de nos calculs étant comme cela planté, nous livrons dans cette édition initiale les tableaux de résultats qui vont suivre.

### **3. TABLEAUX DE RESULTATS.**

Leur liste n'est évidemment pas figée. On peut très bien soumettre à l'expérience tous les matériaux que l'on veut mais à condition d'en connaître les caractéristiques déterminantes. Or, s'agissant de matériaux connus sous forme commerciale, les données sont souvent complaisantes, fausses ou incomplètes.

Pour d'autres, les variations honnêtes de caractéristiques (par exemple pour le bois) sont telles qu'il faut faire un choix moyen entre celles-ci et se dire que le modèle choisi n'étant pas déterministe par principe on ne s'intéresse dans les résultats qu'à des comparaisons, à des tendances générales.

On a choisi également la gamme d'épaisseurs pour chaque matériau en fonction de ses cas normaux d'emploi dans les constructions.

Un résultat orphelin est donné dans les tableaux : il s'agit de **l'Effusivité**.

Les autres calculs n'en dépendent pas. L'effusivité, qui est une donnée peu scientifique mesure en fait ce qu'est la sensation que l'on a au contact d'un matériau. La chaleur du doigt que l'on pose sur un matériau s'échappe-t-elle à l'intérieur et celui-ci nous semble-t-il froid ou au contraire reste-t-elle en surface et celui-ci nous semble-t-il chaud ? On peut aussi dire que cette donnée qualifie bien ce qui est de la température de surface très immédiate du matériau au contact de l'air ambiant. On va chercher à ce que les parois internes des maisons soient constituées des matériaux les moins effusifs dont la température sera donc la plus proche de celle de l'air local ce qui est propre à augmenter la sensation de confort et à limiter la température de l'air lui-même pour obtenir une sensation de confort donnée.

En chemin le lecteur constate que nous donnons les caractéristiques d'isolation classiques en même temps que les déphasages et atténuations. Il s'agit de :

- la **résistance thermique**,

- la **puissance surfacique ou conductance thermique**

Ces deux nombres sont opposés l'un de l'autre, les résistances étant additives en épaisseur.

Les données initiales qui sont utilisées sont sources d'infinies discussions du fait des nombreuses variantes de caractéristiques admises par les matériaux réels souvent seulement connus par des documents commerciaux.

On peut indiquer que dans une paroi réelle, deux matériaux étant associés, leurs déphasages s'ajoutent, et leurs atténuations se multiplient pour donner les deux résultats pour l'ensemble.

Il est promis par les auteurs que les présentes seront autant que possible révisées avec adjonction de tableaux aux caractéristiques de base plus précises à la recherche desquelles il restent.

La laine de cellulose, qui est certainement l'un des matériaux d'isolation les plus intéressants à tous égards a été récemment ajoutée à notre liste en considérant provisoirement que sa chaleur massique est 1994 J/kg.C°. Deux versions sont données : laine soufflée mise en place dans le solivage des combles perdus avec une masse volumique de 40 Kg/m<sup>3</sup>, laine projetée avec de l'eau pour constituer un flochage avec une masse volumique de 65 Kg/m<sup>3</sup>.

## 1. Matériau et commentaires.

### Béton de granulats lourds siliceux et calcaires. (parois pleines)

## 2. Données initiales.

Désignations	Conductivité thermique	Masse volumique	Chaleur massique
Symboles	$\Lambda$	$P$	$C$
Unités	W/m.°C	Kg/m <sup>3</sup>	J/Kg.°C
Valeurs.	1,75	2 300	1 100

## 3. Caractéristiques calculées indépendantes de l'épaisseur.

Désignations	Diffusivité	Effusivité	« Inersivité » journalière
Symboles	$a$	$E$	$I_J$
Formules	$a = \lambda / \rho.C$	$E = (\lambda.\rho.C)^{1/2}$	$I_J = (\omega/2.a)^{1/2}$
Unités	m <sup>2</sup> /s	J/m <sup>2</sup> .°C.s <sup>1/2</sup>	m <sup>-1</sup>
Valeurs	69 10 <sup>-8</sup>	2 100	7,26

$$\omega = 2\pi/24 \times 3600 = 7,27 \cdot 10^{-5}, \text{ unité : rd/s}$$

## 3. Caractéristiques dépendant de l'épaisseur (e).

Désignations	Résistance thermique	Puissance surfacique	Déphasage	Atténuation
Symboles	$R$	$U$	$D$	$A$
Formules	$R = e / \lambda$	$U = 1 / R$	$D = e.I_J \cdot 24 / 2\pi$	$A = \exp(-e.I_J)$
Unités ► Epaisseurs ▼	m <sup>2</sup> .°C / W	W / m <sup>2</sup> .°C	Heures	Sans unité
0,1m	0,057	17,5	2,77	0,48
0,12m	0,069	14,6	3,33	0,42
0,16m	0,091	10,9	4,44	0,31
0,20m	0,115	8,75	5,55	0,23
0,25m	0,143	7,00	6,93	0,16
0,30m	0,17	5,83	8,32	0,11
0,40m	0,229	4,37	10,09	0,055

Le béton plein a bien une forte masse volumique mais une faible chaleur massique.

L'inersivité journalière obtenue n'est pas si mauvaise, mais ce matériau est si coûteux en énergie à fabriquer !



## 1. Matériau et commentaires.

### Granit considéré massif hors effet des remplissages en terres

## 2. Données initiales.

Désignations	Conductivité thermique	Masse volumique	Chaleur massique
Symboles	$\Lambda$	$P$	$C$
Unités	W/m.°C	Kg/m <sup>3</sup>	J/Kg.°C
Valeurs.	3,5	2 700	810

## 3. Caractéristiques calculées indépendantes de l'épaisseur.

Désignations	Diffusivité	Effusivité	« Inersivité » journalière
Symboles	$A$	$E$	$I_J$
Formules	$a = \lambda / \rho.C$	$E = (\lambda.\rho.C)^{1/2}$	$I_J = (\omega/2.a)^{1/2}$
Unités	m <sup>2</sup> /s	J/m <sup>2</sup> .°C.s <sup>1/2</sup>	m <sup>-1</sup>
Valeurs	160 10 <sup>-8</sup>	2766	4,76

$$\omega = 2\pi/24 \times 3600 = 7,27 \cdot 10^{-5}, \text{ unité : rd/s}$$

## 3. Caractéristiques dépendant de l'épaisseur (e).

Désignations	Résistance thermique	Puissance surfacique	Déphasage	Atténuation
Symboles	$R$	$U$	$D$	$A$
Formules	$R = e / \lambda$	$U = 1 / R$	$D = e.I_J . 24 / 2\pi$	$A = \exp(-e.I_J)$
Unités ► Epaisseurs ▼	m <sup>2</sup> .°C / W	W / m <sup>2</sup> .°C	heures	Sans unité
0,02m	0,006	167	0,41	0,91
0,05m	0,014	71	1,03	0,78
0,1m	0,028	36	2,07	0,62
0,40m	0,11	9,1	8,28	0,15
0,80m	0,23	4,3	<b>16,56</b>	<b>0,02</b>

Cette fiche n'a pour intérêt que de montrer que le modèle de calcul utilisé donne bien, pour l'épaisseur 80 cm un déphasage et une atténuation très performantes. Cependant ce magnifique produit n'est absolument pas isolant. L'efficacité des murs en Granit, en été est frappante et ceci qui relève d'une expérience bien confirmée fait partie des justifications du présent travail...

## 1. Matériau et commentaires.

### Mousse de polyuréthane (chaleur massique à vérifier)

## 2. Données initiales.

Désignations	Conductivité thermique	Masse volumique	Chaleur massique
Symboles	$\Lambda$	$P$	$C$
Unités	W/m.°C	Kg/m <sup>3</sup>	J/Kg.°C
Valeurs.	0,029	35	1380

## 3. Caractéristiques calculées indépendantes de l'épaisseur.

Désignations	Diffusivité	Effusivité	« Inersivité » journalière
Symboles	$A$	$E$	$I_J$
Formules	$a = \lambda / \rho.C$	$E = (\lambda.\rho.C)^{1/2}$	$I_J = (\omega/2.a)^{1/2}$
Unités	m <sup>2</sup> /s	J/m <sup>2</sup> .°C.s <sup>1/2</sup>	m <sup>-1</sup>
Valeurs	60 10 <sup>-8</sup>	37,5	7,78

$$\omega = 2\pi/24 \times 3600 = 7,27 \cdot 10^{-5}, \text{ unité : rd/s}$$

## 3. Caractéristiques dépendant de l'épaisseur (e).

Désignations	Résistance thermique	Puissance surfacique	Déphasage	Atténuation
Symboles	$R$	$U$	$D$	$A$
Formules	$R = e / \lambda$	$U = 1 / R$	$D = e.I_J \cdot 24 / 2\pi$	$A = \exp(-e.I_J)$
Unités ► Epaisseurs ▼	m <sup>2</sup> .°C / W	W / m <sup>2</sup> .°C	heures	Sans unité
0,05m	1,72	0,58	1,48	0,67
0,1m	3,44	0,29	2,97	0,45
0,12m	4,14	0,241	3,56	0,39
0,16m	5,51	0,181	4,75	0,29
0,20m	6,89	0,145	5,94	0,21

La mousse de polyuréthane a de très bons résultats du point de vue de l'isolation contre le froid en régime établi.

L'inersivité journalière est un peu faible ce qui donne des déphasages et des atténuations peu intéressants.

Cet isolant n'est pas perméable à la vapeur d'eau, ce qui est un gros handicap. Il ne peut pas être généralisé dans une même construction, mais sa performance d'hiver est excellente.

## 1. Matériau et commentaires.

### Laine de verre.

## 2. Données initiales.

Désignations	Conductivité thermique	Masse volumique	Chaleur massique
Symboles	$\Lambda$	$P$	$C$
Unités	W/m.°C	Kg/m <sup>3</sup>	J/Kg.°C
Valeurs.	0,04	120	828

## 3. Caractéristiques calculées indépendantes de l'épaisseur.

Désignations	Diffusivité	Effusivité	« Inersivité » journalière
Symboles	$A$	$E$	$I_J$
Formules	$a = \lambda / \rho.C$	$E = (\lambda.\rho.C)^{1/2}$	$I_J = (\omega/2.a)^{1/2}$
Unités	m <sup>2</sup> /s	J/m <sup>2</sup> .°C.s <sup>1/2</sup>	m <sup>-1</sup>
Valeurs	40 10 <sup>-8</sup>	63	9,5

$$\omega = 2\pi/24 \times 3600 = 7,27 \cdot 10^{-5}, \text{ unité : rd/s}$$

## 3. Caractéristiques dépendant de l'épaisseur (e).

Désignations	Résistance thermique	Puissance surfacique	Déphasage	Atténuation
Symboles	$R$	$U$	$D$	$A$
Formules	$R = e / \lambda$	$U = 1 / R$	$D = e.I_J \cdot 24 / 2\pi$	$A = \exp(-e.I_J)$
Unités ► Epaisseurs ▼	m <sup>2</sup> .°C / W	W / m <sup>2</sup> .°C	heures	Sans unité
0,1m	2,5	0,4	3,62	0,38
0,16m	4,00	0,25	5,8	0,21
0,20m	5,00	0,2	7,25	0,15

La laine de verre est l'isolant le plus répandu à cause de son prix. Elle exige une protection parfaite et continue contre la vapeur car elle craint l'humidité et de toutes façons elle n'est pas durable.

Mais son inersivité n'est pas si mauvaise qu'on aurait pu le craindre.

## 1. Matériau et commentaires.

**Liège expansé (plaques rigides, la conductivité choisie est peut être optimiste)**

## 2. Données initiales.

Désignations	Conductivité thermique	Masse volumique	Chaleur massique
Symboles	$\Lambda$	$P$	$C$
Unités	W/m.°C	Kg/m <sup>3</sup>	J/Kg.°C
Valeurs.	0,037	105	2023

## 3. Caractéristiques calculées indépendantes de l'épaisseur.

Désignations	Diffusivité	Effusivité	« Inersivité » journalière
Symboles	$A$	$E$	$I_J$
Formules	$a = \lambda / \rho.C$	$E = (\lambda.\rho.C)^{1/2}$	$I_J = (\omega/2.a)^{1/2}$
Unités	m <sup>2</sup> /s	J/m <sup>2</sup> .°C.s <sup>1/2</sup>	m <sup>-1</sup>
Valeurs	17,4 10 <sup>-8</sup>	88	14,4

$$\omega = 2\pi/24 \times 3600 = 7,27 \cdot 10^{-5}, \text{ unité : rd/s}$$

## 3. Caractéristiques dépendant de l'épaisseur (e).

Désignations	Résistance thermique	Puissance surfacique	Déphasage	Atténuation
Symboles	$R$	$U$	$D$	$A$
Formules	$R = e / \lambda$	$U = 1 / R$	$D = e.I_J \cdot 24 / 2\pi$	$A = \exp(-e.I_J)$
Unités ► Epaisseurs ▼	m <sup>2</sup> .°C / W	W / m <sup>2</sup> .°C	Heures	Sans unité
0,02m	0,54	1,85	1,10	0,75
0,05m	1,35	0,74	2,75	0,48
0,1m	2,70	0,37	5,50	0,23
0,12m	3,24	0,30	6,60	0,18
0,16m	4,32	0,23	8,80	0,1
0,20m	5,4	0,18	11,00	0,056

Le liège expansé a de très bons résultats dans tous les domaines à la fois. Son inersivité est très élevée et donc il permet des déphasages importants.

Pour d'autres raisons encore, il s'agit de l'isolant le plus satisfaisant qui soit, dont il faudra bien reparler, il est pourtant pénalisé par son prix et une origine devenue étrangère et lointaine.

## 1. Matériau et commentaires.

### Laine de bois.

## 2. Données initiales.

Désignations	Conductivité thermique	Masse volumique	Chaleur massique
Symboles	$\Lambda$	$P$	$C$
Unités	W/m.°C	Kg/m <sup>3</sup>	J/Kg.°C
Valeurs.	0,042	140	2100

## 3. Caractéristiques calculées indépendantes de l'épaisseur.

Désignations	Diffusivité	Effusivité	« Inersivité » journalière
Symboles	$A$	$E$	$I_J$
Formules	$a = \lambda / \rho.C$	$E = (\lambda.\rho.C)^{1/2}$	$I_J = (\omega/2.a)^{1/2}$
Unités	m <sup>2</sup> /s	J/m <sup>2</sup> .°C.s <sup>1/2</sup>	m <sup>-1</sup>
Valeurs	14,3 10 <sup>-8</sup>	111	15,9

$$\omega = 2\pi/24 \times 3600 = 7,27 \cdot 10^{-5}, \text{ unité : rd/s}$$

## 3. Caractéristiques dépendant de l'épaisseur (e).

Désignations	Résistance thermique	Puissance surfacique	Déphasage	Atténuation
Symboles	$R$	$U$	$D$	$A$
Formules	$R = e / \lambda$	$U = 1 / R$	$D = e.I_J \cdot 24 / 2\pi$	$A = \exp(-e.I_J)$
Unités ► Epaisseurs ▼	m <sup>2</sup> .°C / W	W / m <sup>2</sup> .°C	heures	Sans unité
0,02m	0,47	2,12	1,21	0,72
0,05m	1,19	0,84	3,04	0,45
0,1m	2,38	0,42	6,07	0,20
0,16m	3,8	0,26	9,71	0,08
0,20m	4,76	0,21	12,15	0,04

Ses caractéristiques donnent à la laine de bois de très bonnes performances pour l'été en ayant d'honorables résultats pour l'hiver.

L'inersivité obtenue est très élevée ce qui donne des valeurs de déphasage et d'atténuation très satisfaisantes.

## 1. Matériau et commentaires.

**Bois (feuillus non lourds, il faudrait prendre les espèces les unes après les autres...)**

## 2. Données initiales.

Désignations	Conductivité thermique	Masse volumique	Chaleur massique
Symboles	$\Lambda$	$P$	$C$
Unités	W/m.°C	Kg/m <sup>3</sup>	J/Kg.°C
Valeurs.	0,15	500	2400

## 3. Caractéristiques calculées indépendantes de l'épaisseur.

Désignations	Diffusivité	Effusivité	« Inersivité » journalière
Symboles	$A$	$E$	$I_J$
Formules	$a = \lambda / \rho.C$	$E = (\lambda.\rho.C)^{1/2}$	$I_J = (\omega/2.a)^{1/2}$
Unités	m <sup>2</sup> /s	J/m <sup>2</sup> .°C.s <sup>1/2</sup>	m <sup>-1</sup>
Valeurs	12,5 10 <sup>-8</sup>	424	17

$$\omega = 2\pi/24 \times 3600 = 7,27 \cdot 10^{-5}, \text{ unité : rd/s}$$

## 3. Caractéristiques dépendant de l'épaisseur (e).

Désignations	Résistance thermique	Puissance surfacique	Déphasage	Atténuation
Symboles	$R$	$U$	$D$	$A$
Formules	$R = e / \lambda$	$U = 1 / R$	$D = e.I_J \cdot 24 / 2\pi$	$A = \exp(-e.I_J)$
Unités ► Epaisseurs ▼	m <sup>2</sup> .°C / W	W / m <sup>2</sup> .°C	heures	Sans unité
0,01 m	0,067	15	0,65	0,84
0,02m	0,13	7,5	1,3	0,71
0,05m	0,33	3	3,24	0,42
0,1m	0,66	1,5	6,48	0,18
0,12m	0,8	1,25	7,99	0,13
0,16m	1,06	0,94	10,38	0,06
0,20m	1,33	0,75	12,96	0,033

A n'en pas douter, la valeur très élevée de l'inersivité du bois moyen choisi donne à ce matériau un intérêt particulier dans la construction à condition qu'il y figure sous forme massive. En revanche, l'isolation procurée pour l'hiver indique de l'associer à des isolants spécialisés, liège ou laine de bois.

Ce résultat explique les techniques autrichiennes de construction, mais donne à réfléchir sur celles des maisons de rondins dont les 20 au plus cm d'épaisseur sont ridicules...

## 1. Matériau et commentaires.

**Ouate ou laine de cellulose projetée (avec de l'eau), masse volumique 65 KG/m3.**

## 2. Données initiales.

Désignations	Conductivité thermique	Masse volumique	Chaleur massique
Symboles	$\Lambda$	$P$	$C$
Unités	W/m.°C	Kg/m <sup>3</sup>	J/Kg.°C
Valeurs.	0,038	65	1994

## 3. Caractéristiques calculées indépendantes de l'épaisseur.

Désignations	Diffusivité	Effusivité	« Inersivité » journalière
Symboles	$A$	$E$	$I_J$
Formules	$a = \lambda / \rho.C$	$E = (\lambda.\rho.C)^{1/2}$	$I_J = (\omega/2.a)^{1/2}$
Unités	m <sup>2</sup> /s	J/m <sup>2</sup> .°C.s <sup>1/2</sup>	m <sup>-1</sup>
Valeurs	29,3 10 <sup>-8</sup>	NS	11,13

$$\omega = 2\pi/24 \times 3600 = 7,27 \cdot 10^{-5}, \text{ unité : rd/s}$$

## 3. Caractéristiques dépendant de l'épaisseur (e).

Désignations	Résistance thermique	Puissance surfacique	Déphasage	Atténuation
Symboles	$R$	$U$	$D$	$A$
Formules	$R = e / \lambda$	$U = 1 / R$	$D = e.I_J \cdot 24 / 2\pi$	$A = \exp(-e.I_J)$
Unités ► Epaisseurs ▼	m <sup>2</sup> .°C / W	W / m <sup>2</sup> .°C	heures	Sans unité
0,16m	4,20	0,24	6,8	0,168
0,20m	5,26	0,19	8,5	0,107

La ouate de cellulose projetée a des performances un peu supérieures du point de vue thermique pour l'hiver comme pour l'été à la laine de verre... Il reste à mieux connaître les valeurs physiques de ces matériaux.

## 1. Matériau et commentaires.

### Ouate ou Laine de Cellulose soufflée à 40 KG/m<sup>3</sup>.

## 2. Données initiales.

Désignations	Conductivité thermique	Masse volumique	Chaleur massique
Symboles	$\Lambda$	$P$	$C$
Unités	W/m.°C	Kg/m <sup>3</sup>	J/Kg.°C
Valeurs.	0,038	40	1994

## 3. Caractéristiques calculées indépendantes de l'épaisseur.

Désignations	Diffusivité	Effusivité	« Inersivité » journalière
Symboles	$A$	$E$	$I_J$
Formules	$a = \lambda / \rho.C$	$E = (\lambda.\rho.C)^{1/2}$	$I_J = (\omega/2.a)^{1/2}$
Unités	m <sup>2</sup> /s	J/m <sup>2</sup> .°C.s <sup>1/2</sup>	m <sup>-1</sup>
Valeurs	47,6 10 <sup>-8</sup>	N.S.	8,7

$$\omega = 2\pi/24 \times 3600 = 7,27 \cdot 10^{-5}, \text{ unité : rd/s}$$

## 3. Caractéristiques dépendant de l'épaisseur (e).

Désignations	Résistance thermique	Puissance surfacique	Déphasage	Atténuation
Symboles	$R$	$U$	$D$	$A$
Formules	$R = e / \lambda$	$U = 1 / R$	$D = e.I_J \cdot 24 / 2\pi$	$A = \exp(-e.I_J)$
Unités ► Epaisseurs ▼	m <sup>2</sup> .°C / W	W / m <sup>2</sup> .°C	heures	Sans unité
0,16m	4,2	0,24	5,31	0,24
0,20m	5,26	0,19	6,64	0,17

La ouate de cellulose mise en œuvre par soufflage principalement au sol des combles perdus sous une masse volumique de 40 Kg/m<sup>3</sup> donne un excellent résultat d'isolation avec R=5,26 pour une épaisseur de 20 cm.

Les valeurs de déphasage et d'atténuation sont moins satisfaisantes en raison de la faible masse volumique obtenue par ce procédé.

Il existe une grande variété de ouates de cellulose à présent dans le commerce et les données physiques sont assez variables d'un fabricant à l'autre.