



Étude des capacités isolantes thermiques des cheveux humains

N° 19926

Sommaire

- Introduction
- Modèle théorique
- Études expérimentales
- Conclusion

Sommaire

- **Introduction**
- Modèle théorique
- Études expérimentales
- Conclusion

Présentation du sujet



Isolants organiques :



<https://www.bricorama.fr>

Liège



<https://domeco.ca>

Laine de chanvre



<https://www.ecobati.com>

Laine de mouton

Présentation du sujet



Isolants inorganiques :



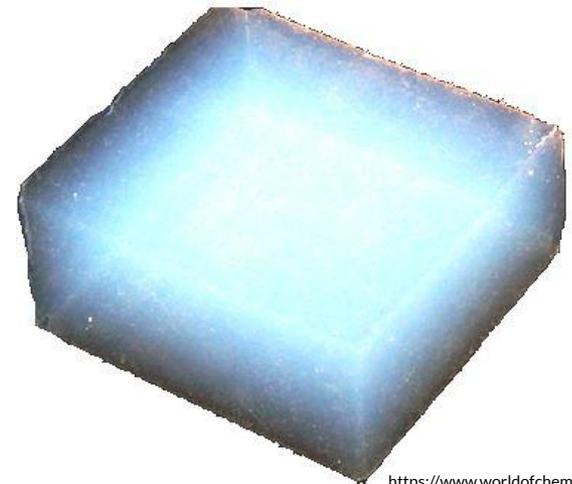
<https://www.pngegg.com>

Laine de roche



<https://www.freepng.fr>

Laine de verre



<https://www.worldofchemicals.com>

Aérogel

Présentation du sujet



Isolants thermiques :

- capacité d'isolation thermique
- coût
- impact sur l'environnement
- applicabilité

Matériau	Conductivité thermique λ (en $\text{W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$)
Carton	0.11
Laine	0.05
Laine de bois	0.036 - 0.042
Laine de roche	0.033 - 0.044
Laine de verre	0.030 - 0.046
Liège	0.038 - 0.042
Aérogel	0.013

- Depuis la RT 2012, il faut que $\lambda \leq 0.065 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$

Présentation du sujet

Cheveu humain : ressource composée à 95 % de kératine, trouvable en grand nombre et considéré comme un déchet

Utilisation du cheveu humain :

- engrais pour cultures
- nettoyage de l'eau de mer après les marées noires
- augmentation de la flexibilité de certains matériaux



<https://www.gouiran-beaute.com>

Contextualisation et problématisation

Étude des caractéristiques isolantes : pour déterminer la viabilité d'un isolant à base de cheveux



<https://www.mon-isolation.pro>

Les cheveux humains pourraient-ils constituer une bonne alternative aux actuels isolants thermiques ?

Sommaire

- Introduction
- **Modèle théorique**
- Études expérimentales
- Conclusion

Loi de Fourier

- Valable uniquement pour la conduction thermique
- Loi macroscopique

$$\vec{\varphi} = -\lambda \overrightarrow{\text{grad}} T$$

$\vec{\varphi}$: densité de flux de chaleur (en W.m^{-2})

T : température (en K)

λ : conductivité thermique (en $\text{W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$)

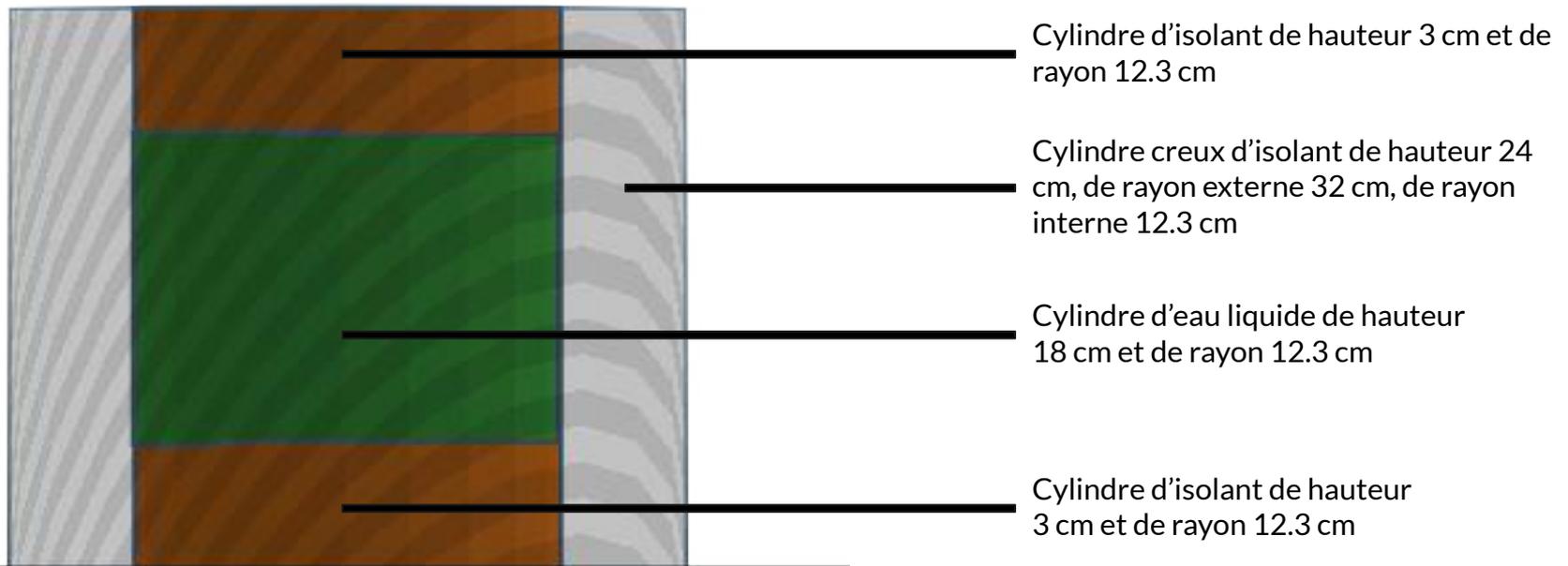
Modélisation du dispositif expérimental



Seau d'eau situé au centre d'une casserole remplie d'isolant

Modélisation du dispositif expérimental

Schéma : Vue de côté

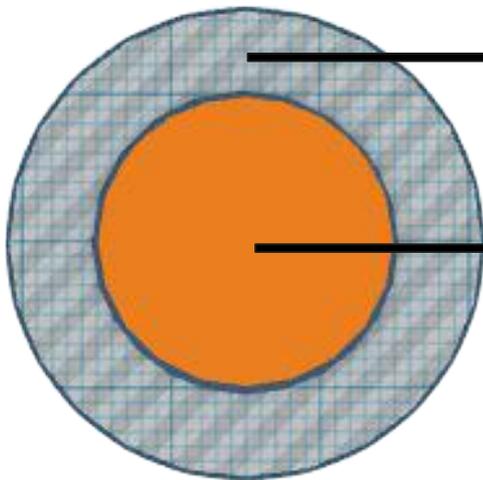


Air

Sol

Modélisation du dispositif expérimental

Schéma : Vue de haut



Cylindre creux d'isolant de hauteur 24 cm, de rayon externe 32 cm, de rayon interne 12.3 cm

Cylindre d'isolant de hauteur 3 cm et de rayon 12.3 cm

Modélisation du dispositif expérimental

Résistance thermique (plane et cylindrique) :

$$R_{pla} = \frac{e}{\lambda S}$$

e : épaisseur de l'isolant (en m)

S : surface d'échange de l'isolant (en m²)

λ : conductivité thermique (en W.m⁻¹.K⁻¹)

$$R_{cyl} = \frac{\ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)}{2\pi\lambda L}$$

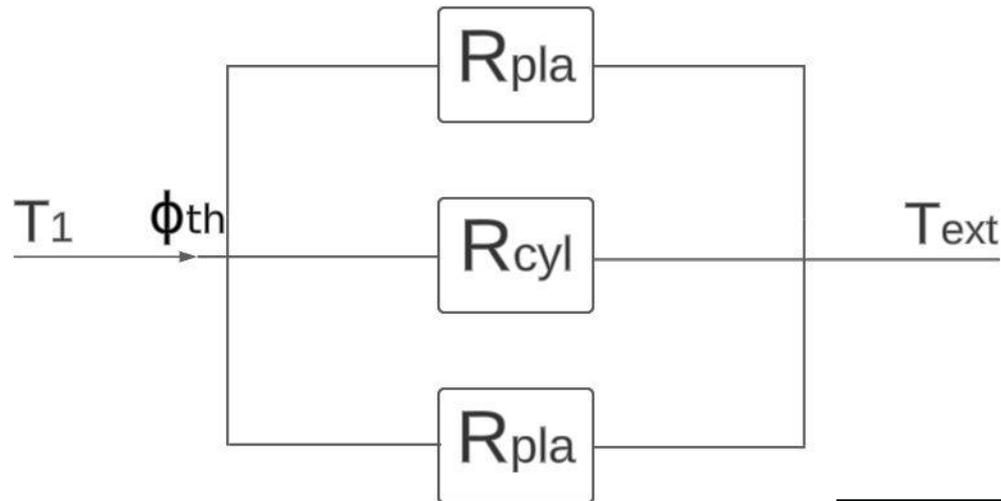
L : longueur du cylindre (en m)

r_1 : rayon interne (en m)

r_2 : rayon externe (en m)

Modélisation du dispositif expérimental

Schéma électrique équivalent :



Résistance thermique équivalente du système R_{eq} tel que

$$\frac{1}{R_{eq}} = \frac{1}{R_{pla}} + \frac{1}{R_{pla}} + \frac{1}{R_{cyl}}$$



Modélisation du dispositif expérimental

Donc :

$$R_{eq} = \frac{e \cdot \ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)}{2\lambda(S \cdot \ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right) + \pi eL)}$$

et ainsi :

$$\lambda = \frac{e \cdot \ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)}{2R_{eq}(S \cdot \ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right) + \pi eL)}$$

Modélisation de la température T₁ de l'eau


Flux thermique :

$$\phi_{th} = \frac{T_1 - T_{ext}}{R_{eq}}$$

Bilan enthalpique :

$$C_p dT_1 = \frac{T_1 - T_{ext}}{R_{eq}} dt$$

Équation différentielle :

$$\frac{dT_1}{dt} + \frac{1}{\tau} T_1 = \frac{T_{ext}}{\tau} \text{ avec } \tau = R_{eq} C_p$$

Modélisation de la température T_1 de l'eau



$$T_1(t) = T_{ext} + (T_1(0) - T_{ext})e^{\frac{-t}{\tau}}$$

$$\text{avec } \tau = C_p \frac{e \cdot \ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)}{2\lambda \left(S \cdot \ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right) + \pi e L \right)}$$

Sommaire

- Introduction
- Modèle théorique
- **Études expérimentales**
- Conclusion

Expérience n°1

Détermination de la conductivité thermique déjà connue d'un isolant (laine de verre)

- Mesure de la température T1 de l'eau en fonction du temps

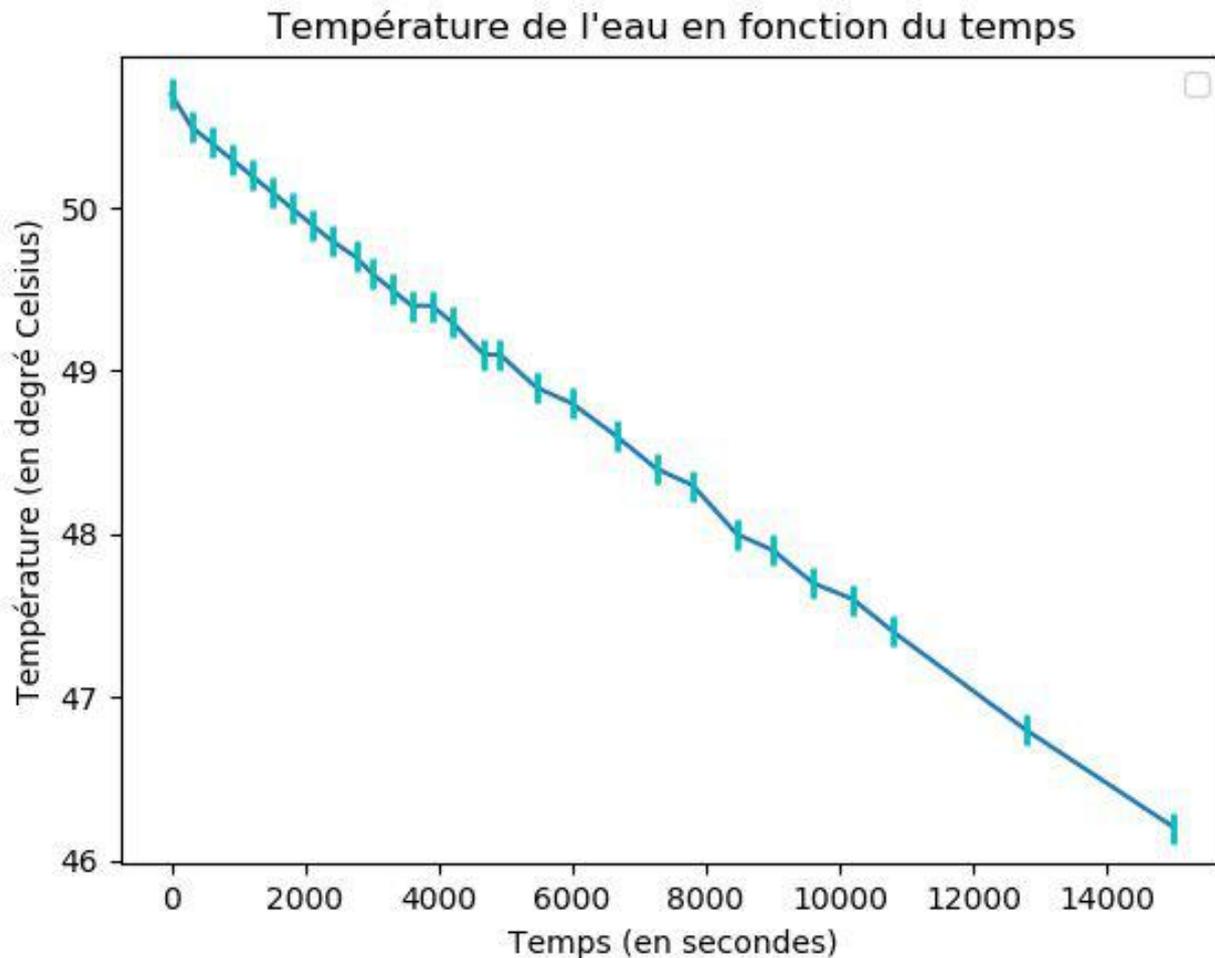
URSA France S.A. 35, Grande Allée du 12 Février 1934 77186 NOISIEL (France) Année apposition marquage CE 03 EN13162 F-ISO 21 MW-EN13162-T1-WS-Z2 25			
Euroclasse	R_D m ² /K/W	λ_D W/(m.K)	d (mm)
F	5.00	0.040	200
5.40 m ² / 1 un	l x b (m) 4.500 x 1.200		



Expérience n°1

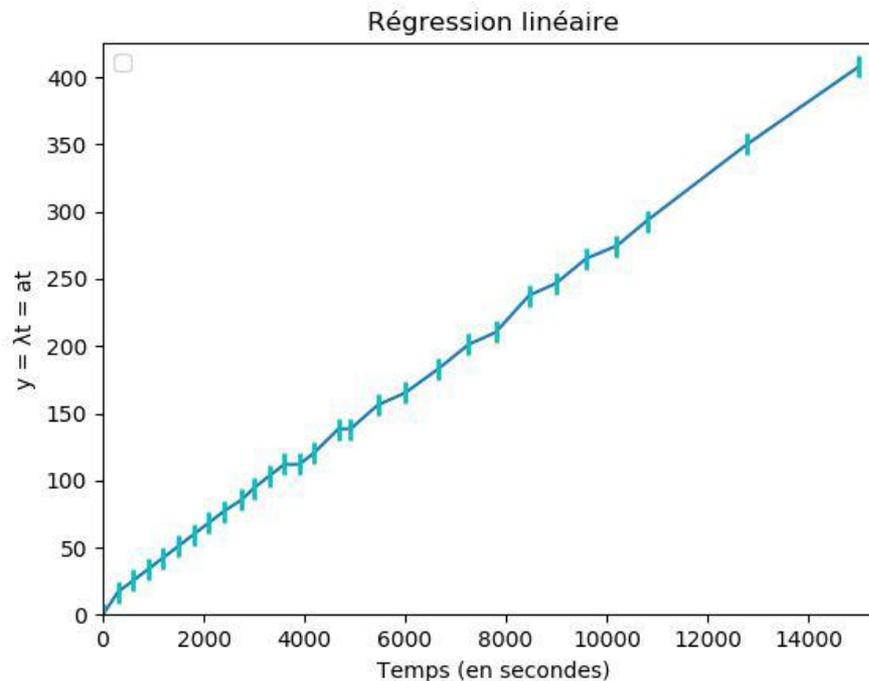


Résultat de l'expérience n°1



Résultat de l'expérience n°1

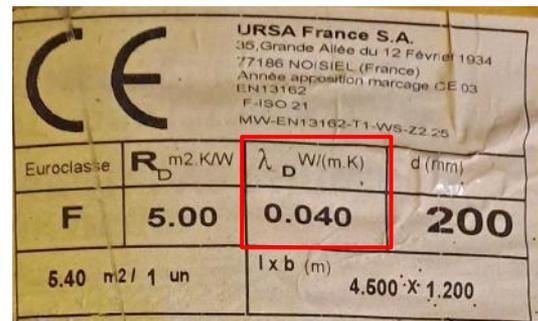
$$\ln\left(\frac{T_1 - T_{ext}}{T_1(0) - T_{ext}}\right) \frac{-C_p.e.\ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)}{2\left(S.\ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right) + \pi eL\right)} = \lambda t = at$$



avec $a = \lambda_{exp} = (2.76 \pm 0.04) 10^{-2} W.m^{-1}.K^{-1}$

Résultat de l'expérience n°1

$$\lambda_{exp} = (2.76 \pm 0.04) 10^{-2} \text{ W.m}^{-1} . \text{K}^{-1}$$



Euroclasse	R_D m ² .KW	λ_D W/(m.K)	d (mm)
F	5.00	0.040	200
5.40 m ² / 1 un		l x b (m) 4.500 x 1.200	

Écart relatif :

$$\frac{|\lambda_{constructeur} - \lambda_{exp}|}{\lambda_{constructeur}} = 31\%$$

Expérience n°2

Détermination de la conductivité thermique des cheveux en fonction de la masse volumique

- même protocole que l'expérience n°1
- 137 kg/m³ jusqu'à 305 kg/m³



Résultat de l'expérience n°2



Masse volumique de cheveux (en kg/m^3)	Conductivité thermique λ (en $\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$)
137	$(5.12 \pm 0,09)10^{-2}$
195	$(3.91 \pm 0,08)10^{-2}$
232	$(3,62 \pm 0,05)10^{-2}$
305	$(3.15 \pm 0,08)10^{-2}$

La conductivité thermique décroît avec la masse volumique

Expérience n°3

Variation de la conductivité thermique en fonction de la structure du matériau

Même protocole qu'à l'expérience n°1

- Mèches entremêlées qui forment des boules (à gauche)
- Cheveux désolidarisés les uns des autres (à droite)



Résultats de l'expérience n°3



Configuration	Conductivité thermique λ (en $\text{W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$)
Mèches entremêlées	$(3.62 \pm 0.05)10^{-2}$
Cheveux désolidarisés	$(3.29 \pm 0.07)10^{-2}$

$$\textit{Ecart relatif} : \frac{|\lambda_{meches} - \lambda_{desolidarise}|}{\lambda_{meche}} = 10.2\%$$

Les cheveux désolidarisés sont un meilleur isolant

Sommaire

- Introduction
- Modèle théorique
- Études expérimentales
- **Conclusion**

Conclusion



Non isolant

Isolant

Matériau	Cuivre	Fonte	Aggloméré	Carton	Cheveu	Laine de verre	Aérogel
Conductivité thermique (en $W.m^{-1}.K^{-1}$)	390	50	0.15	0.11	0.031-0.051	0.026	0.013

- Conductivité thermique dans les mêmes ordres de grandeurs que les isolants et $\lambda \leq 0.065 W.m^{-1}.K^{-1}$
- Meilleur quand les cheveux sont désolidarisés

Ouverture



- Évolution de la conductivité thermique en fonction du temps
- Durée de vie de l'isolant
- Applicabilité en différents climats et milieux