BLAISE PASCAL
PT 2023-2024

DM 13 – à rendre lundi 5 février

Résistances thermiques

Travailler avec vos cours et TD ouverts est **chaudement recommandé** : un DM est un entraînement, pas une évaluation. Réfléchir ensemble est une bonne idée, mais le travail de rédaction doit être individuel. En cas de besoin, **n'hésitez pas à me poser des questions**, à la fin d'un cours, par mail ou via l'ENT.

Flasher ce code pour accéder au corrigé

Ceinture		Travail à réaliser
	Ceinture blanche	Partie I
	Ceinture jaune	Partie I
	Ceinture rouge	Partie II.C obligatoire, II.B facultative
	Ceinture noire	Partie II en entier

I - Isolation et chauffage d'un appartement

PT B 2018

DOCUMENT 1 : Le plan Home Star et les économies d'énergie.

La crise pétrolière de 1973 a amené les pouvoirs publics à des politiques volontaristes en matière d'énergie. La construction des logements obéit depuis lors à des règles d'isolation thermiques. Ces règles sont de plus en plus contraignantes au fil des décennies mais réalisables grâce à des avancées technologiques majeures et ont permis de limiter la facture énergétique française.
Celle-ci représente toutefois encore en 2017 de 2,5 et 3% du *PIB* et 40 % de cette charge est due au chauffage des bâtiments. La France importe en effet la quasi-totalité de l'énergie fossile dont elle a besoin.
La rénovation des bâtiments anciens est donc un enjeu fondamental des prochaines décennies.
La consommation d'énergie pour le chauffage et la production d'eau chaude sanitaire des logements est en moyenne de :

- $100\ kWh.m^{-2}.an^{-1}$ pour ceux construits après 2000.
- $200\ kWh.m^{-2}.an^{-1}$ pour ceux construits entre 1975 et 2000, soit le quart du parc immobilier.
- $375\ kWh.m^{-2}.an^{-1}$ pour les bâtiments d'avant 1975, qui représentent les deux tiers du parc immobilier.

Ces dernières années, la problématique du réchauffement climatique a amené les gouvernements à accélérer la transition énergétique afin d'améliorer le bilan carbone de la France et diversifier ses sources d 'énergie. La France développe en particulier la part des énergies dites renouvelables dans son bouquet énergétique.
De même, les Etats Unis, premier consommateur au monde d'énergie fossile, ont lancé en 2010 le **plan Home star,** plan d'isolation thermique des bâtiments, défendu par le président Obama en personne.

BY-NC-SA

DOCUMENT 2 : Isolation thermique de bâtiments.

On trouve dans une notice pour l'isolation thermique des bâtiments, les valeurs suivantes de conductances thermiques **pour une surface unité de matériau** :

Eléments du bâtiment	Conductance thermique pour un m^2 de surface en USI N.B : Il est appelé coefficient U_W de performance. Il inclut toutes les déperditions (conductif et conducto-convectif)
Fenêtre simple vitrage	U_W = 6,0
Fenêtre double vitrage	U_W = 3 ,0
Mur plein d'épaisseur 30cm	U_W = 2,0
Mur creux d'épaisseur 30cm	U_W = 1,5
Polystyrène d'épaisseur 2cm	U_W = 0,5

Document 3 : Conductivités thermiques en USI

Matériau	Conductivité thermique en USI
Cuivre	400
Verre à vitre	1,0
Air sec	0,03
Laine de verre	0,04

Question 10 : Utilisation des documents 2 et 3
Commenter physiquement les documents 2 et 3. On donnera deux commentaires physiques **en français** par document.

Question 11 : En faisant un schéma, expliquer ce qu'est le double vitrage. Quel est l'intérêt d'une couche d'air dans le double vitrage ? Justifier soigneusement vos réponses en utilisant les documents fournis.

Question 12 : « Déperdition » à travers les fenêtres
On se place dans cette partie en hiver et en Alsace. Le différentiel moyen de température entre l'intérieur de la maison et l'extérieur est supposé de manière simplifiée égal à une valeur moyenne $\Delta T = 10K$ pendant une durée $\Delta t = 5{,}5 mois \approx 4000\ heures$ et de $0K$ (Coût nul) le reste de l'année. On présentera les résultats sous forme d'un tableau **à reproduire sur la copie.**

a) Calculer le courant ou flux thermique Φ traversant **un mètre carré** de fenêtre simple vitrage puis un mètre carré de fenêtre double vitrage.
b) En déduire l'énergie E consommée **en kWh** pour **un mètre carré** de fenêtre pendant l'année et le coût correspondant en Euros.

	$\Phi\,(W)$	$E\,(kWh)$ Sur l'année	Coût annuel (€)
Simple vitrage			
Double vitrage			

BY-NC-SA

Question 13 : « **Déperdition » à travers les murs non isolés puis isolés**
On présentera les résultats sous forme d'un tableau **à reproduire sur la copie.**

a) Calculer le courant ou flux thermique traversant **dans les mêmes conditions un mètre carré** de mur plein de $30\ cm$ d'épaisseur
b) En déduire l'énergie consommée **en kWh** et le coût annuel par **mètre carré de mur.**
c) Calculer littéralement puis numériquement en Euro l'économie réalisée si l'on isole totalement le mètre carré de mur d'un seul côté avec une couche de polystyrène de 2cm. Commenter.

	$\Phi\,(kW)$	$E\,(kWh)$ $Sur\ l'année$	$Coût\ annuel\ (€)$
Mur (surface unité)			
Mur isolé (surface unité)			

Question 14 : Dans le cadre d'appartements dits « à énergie positive », on positionne de grandes fenêtres au sud, de petites fenêtres au Nord. Enfin, on plante des arbres à feuilles caduques au niveau de la face Sud. On se place toujours en Alsace.
a) Proposer une explication.
b) A-t-on intérêt à avoir des volets en métal ou en bois ? Justifier votre réponse.

Question 15 : On considère désormais un appartement standard de surface au sol 100 mètres carrés modélisé par une seule pièce de hauteur sous plafond de $2{,}5$ mètres.
Calculer le volume et la masse d'air sec contenue dans la pièce.
Donnée : La masse volumique de l'air de l'appartement est prise égal à $1{,}2\ kg$ par mètre cube et supposée constante au cours des transformations thermodynamiques.

Question 16 : La chaleur massique de l'air sec à pression constante est de :
$\boldsymbol{C_{Pm} = 1kJ.K^{-1}.kg^{-1}}$ **.**
Les transformations thermodynamiques de l'air seront supposées isobares.
a) Calculer la capacité thermique C de l'air sec de l'appartement.
b) En supposant l'appartement idéalement isolé et donc sans aucune déperdition, calculer la durée de chauffage avec des convecteurs électriques de puissance totale $5\ kW$ pour amener l'air sec de l'appartement de $10°C$ à $20°C$.
c) Commenter physiquement le résultat.

Question 17 : L'appartement comprend quatre fenêtres de $2{,}5$ mètres carrés chacune.

a) Calculer la conductance thermique d'une fenêtre avec les données précédentes pour un simple et un double vitrage.
b) En tant que résistances thermiques, les quatre fenêtres sont-elles en série ou en parallèle ? Justifier votre réponse.
c) En déduire la conductance thermique des 4 fenêtres puis la puissance ou courant thermique qui les traverse pour un simple puis pour un double vitrage dans les conditions de la question 12.
d) En supposant que cette puissance correspond à 20% de la puissance transférée de l'appartement vers l'extérieur, déterminer en régime permanent la puissance totale P_0 nécessaire des convecteurs électriques en hiver pour un différentiel de température de $10°C$ avec simple puis avec double vitrage. Est-ce en accord avec les données du document 1 ?

Question 18 : Si l'on augmente la température de la pièce de $1°C$, toutes choses égales par ailleurs, quel est le coût supplémentaire relatif (en $\%$)du chauffage ?

BY-NC-SA

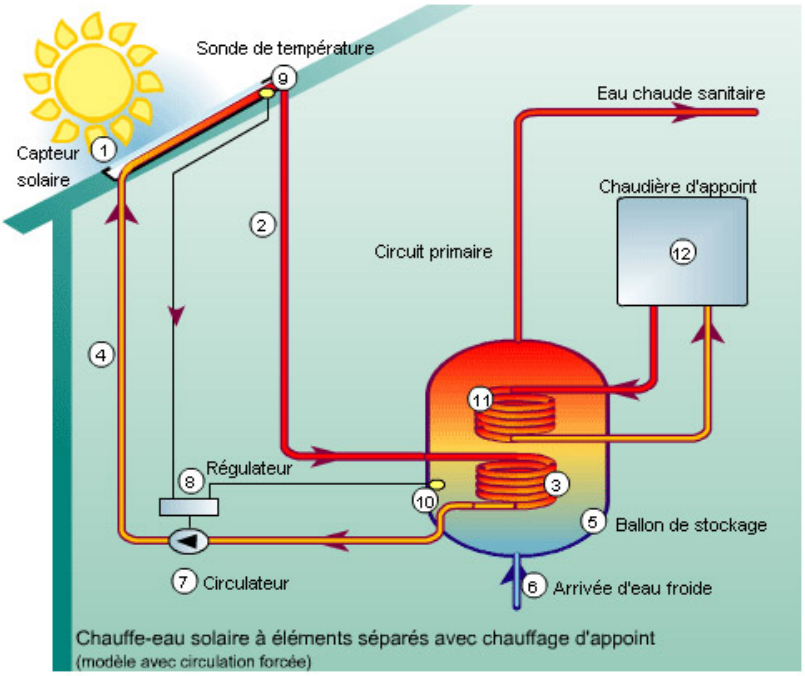
II - Circuit d'eau chaude domestique

CCP MP 2015

L'énoncé original ne donne pas vraiment de contexte sur le système étudié, ce que je trouve un peu dommage. Dans l'idée, il pourrait s'agir d'un modèle de chauffe-eau solaire :

- ▷ de l'eau glycolée (le glycol est un additif anti-gel) circulant dans un circuit primaire est chauffée dans un panneau solaire thermique, à ne pas confondre avec un panneau photovoltaïque ;
- ▷ cette eau glycolée est ensuite mise en contact d'eau « pure » à usage sanitaire à l'intérieur d'un ballon d'eau chaude, auquel elle restitue la chaleur emmagasinée.

Une différence notable néanmoins entre ce système et le modèle étudié est la nature de l'échangeur : le sujet modélise un échangeur double flux, alors que qu'un chauffe-eau solaire contient un échangeur simple flux. Le sujet n'en est pas un moins bon entraînement pour autant !



Chauffe eau solaire individuel «CESI» (source : Ademe)

Figure 1 – Schéma de principe d'un chauffe-eau solaire.

BY-NC-SA

Partie II.B. Echangeur thermique

L'échangeur thermique est un organe fréquemment utilisé dans les installations thermiques. On le trouve dans des pompes à chaleur, des machines à froid ou certains cumulus d'eau chaude.

Le principe d'un échangeur thermique est de permettre le transfert d'énergie thermique entre deux fluides. Dans l'étude menée ici, ce sont :
- l'eau glycolée circulant dans le cumulus d'eau chaude d'une part ;
- l'eau à usage domestique d'une habitation d'autre part.

Ces deux liquides, supposés indilatables et incompressibles, sont mis en contact thermique au sein de l'échangeur via des canalisations dans lesquelles ils se déplacent en sens opposé. C'est dans la zone active de l'échangeur, représentée sur les figures 7 et 8 ci-dessous, que s'opère le transfert thermique entre les deux fluides. Hormis sur leur surface commune, les canalisations sont calorifugées.

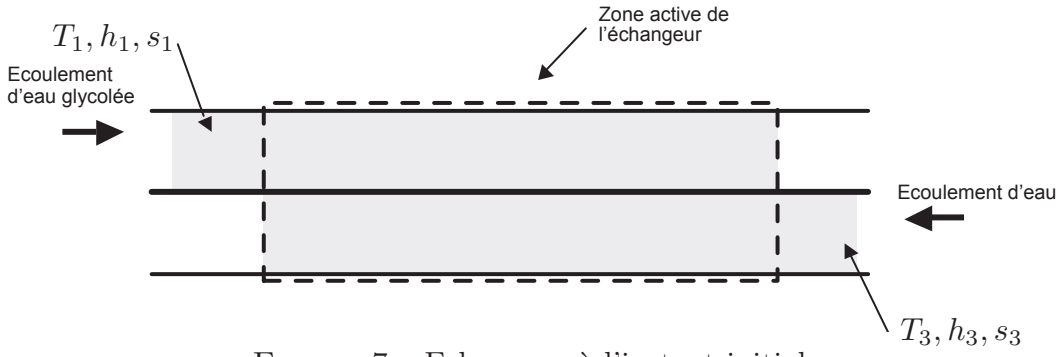


FIGURE 7 – Echangeur à l'instant initial.

FIGURE 8 – Echangeur à l'instant final.

On note d_e et d_g respectivement le débit massique d'eau et d'eau glycolée. On note également T_i, h_i, s_i respectivement : la température, l'enthalpie massique, l'entropie massique du fluide désigné par $i \in \{1; 2; 3; 4\}$, sachant que :
- $i = 1$ fait référence à l'entrée d'eau glycolée dans la zone active.
- $i = 2$ fait référence à la sortie d'eau glycolée de la zone active.
- $i = 3$ fait référence à l'entrée d'eau dans la zone active.
- $i = 4$ fait référence à la sortie d'eau de la zone active.

Les écoulements sont supposés horizontaux et en régime stationnaire. On néglige la variation d'énergie cinétique des fluides lors de leur passage dans l'échangeur.

II.4. Bilan d'enthalpie

On donne l'expression du premier principe de la thermodynamique pour un système ouvert en écoulement permanent :

$$\sum_{k' \in \text{ Sorties}} d_{k'}\, h_{k'} \;-\; \sum_{k \in \text{ Entrées}} d_k\, h_k = p_u + p_{th}\ , \tag{4}$$

BY-NC-SA

où p_u désigne la puissance massique échangée entre le système et les parois mobiles qui le délimitent et p_{th} est la puissance massique échangée entre le système et l'extérieur par transfert thermique.

II.4.a. Donner la signification physique des termes du membre de gauche de l'égalité (4).

II.4.b. On note c_e et c_g respectivement la capacité thermique massique de l'eau et de l'eau glycolée. Déterminer la relation entre : c_g, c_e, d_g, d_e, T_1, T_2, T_3 et T_4. Il est attendu de définir très clairement le système d'étude.

II.4.c. On donne : $c_g = 3,29\,\mathrm{kJ.kg^{-1}.K^{-1}}$, $c_e = 4,18\,\mathrm{kJ.kg^{-1}.K^{-1}}$, $d_g = 10,0\,\mathrm{kg.s^{-1}}$, $T_1 = 10,0\ °\mathrm{C}$, $T_2 = 15,0\ °\mathrm{C}$, $T_3 = 15,0\ °\mathrm{C}$ et $T_4 = 12,0\ °\mathrm{C}$. Calculer numériquement le débit massique d'eau d_e.

II.5. Bilan d'entropie

II.5.a. Ecrire une relation analogue à (4) traduisant le second principe de la thermodynamique pour un système ouvert en écoulement permanent et donner la signification physique de chacun des termes intervenant dans cette relation.

II.5.b. Déterminer l'expression du taux de création d'entropie par unité de temps dans l'échangeur. Effectuer l'application numérique et indiquer l'origine physique de l'irréversibilité le cas échéant.

Donnée : l'entropie d'un corps indilatable et incompressible, de capacité thermique massique c et de température T, est donnée, à une constante additive près, par : $s(T) = c\ln T + cte$.

Partie II.C. Isolation thermique d'une canalisation d'eau

Après avoir transité dans l'échangeur thermique, l'eau alimente le réseau d'une habitation. Afin de limiter les pertes thermiques dans les canalisations, on se propose, dans cette partie, d'étudier quelques solutions d'isolation thermique.

La canalisation est cylindrique, d'axe Oz, de rayon r_i et de longueur $L \gg r_i$. L'eau y circulant est à la température T_i. L'objectif de cette partie est de comparer les pertes latérales de la canalisation sans ou avec un isolant.

On adopte le modèle suivant :
- seule la conduction thermique radiale, c'est-à-dire dans une direction perpendiculaire à l'axe Oz, est prise en compte. On néglige donc la conduction selon l'axe Oz ;
- la température de l'eau dans la canalisation est supposée uniforme. La conduction radiale s'opère donc pour $r \geq r_i$ uniquement ;
- l'étude est menée en régime stationnaire ;
- on néglige l'épaisseur de la paroi de la canalisation.

Sans isolant (figure 9, page 14), la canalisation est en contact avec l'air intérieur de l'habitation, de température T_0.

II.6. La densité surfacique de puissance thermique échangée par transfert conducto-convectif au niveau de la surface latérale de la canalisation est donnée par $\vec{j_Q} = h\,(T_i - T_0)\,\vec{u_r}$ (loi de Newton), où h est une constante dimensionnée appelée coefficient d'échange et $\vec{u_r}$ le vecteur unitaire radial de la base cylindrique. Exprimer la puissance thermique P_{th} transférée au niveau de la surface latérale du système.

BY-NC-SA

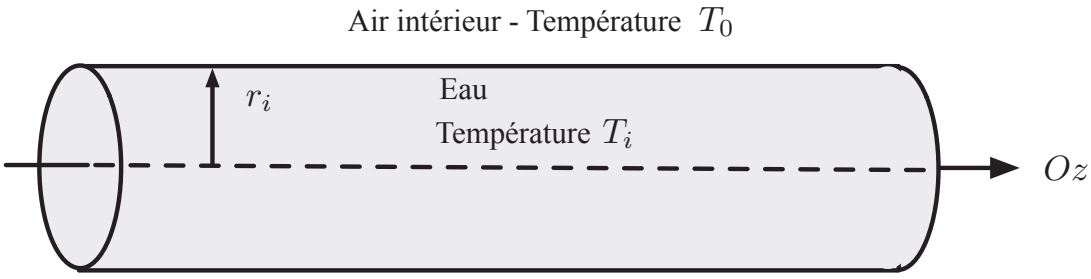


FIGURE 9 – Canalisation sans isolant.

On applique désormais un isolant thermique sur la canalisation précédente. L'isolant possède un rayon intérieur r_i et un rayon extérieur r_e (voir figure 10). En un point situé à une distance r de l'axe Oz et situé à l'intérieur de l'isolant, c'est-à-dire pour $r_i \leq r \leq r_e$ en repérage cylindrique, la température est notée $T(r)$. On note $T_e = T(r_e)$ et $T_i = T(r_i)$.

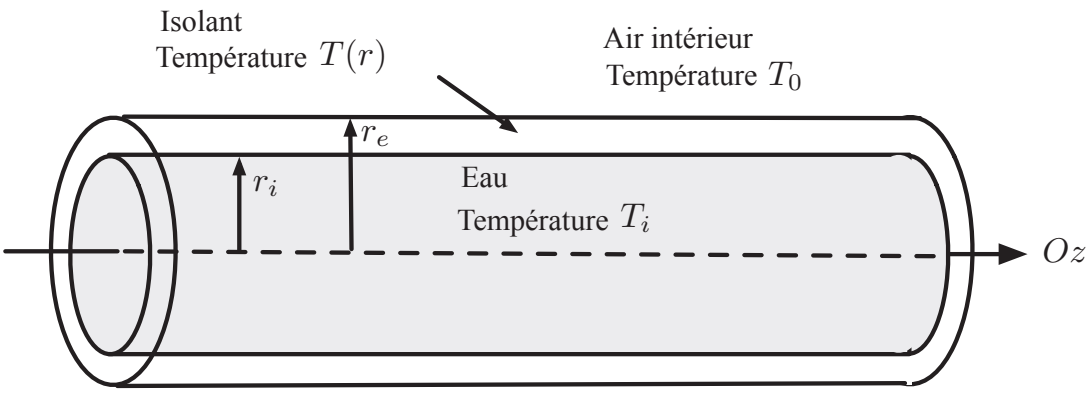


FIGURE 10 – Canalisation avec isolant.

Dans la suite, l'échange conducto-convectif au niveau de la surface <u>intérieure</u> de l'isolant n'est pas pris en compte.

La température de part et d'autre de la surface intérieure de l'isolant est continue :
$T(r_i^-) = T(r_i^+) = T_i$.

II.7. On suppose que le coefficient d'échange en $r = r_e$ est h. Exprimer la puissance thermique $P_{th,isolant}$ échangée au niveau de la surface latérale extérieure de l'isolant par conduction-convection en fonction de h, T_0, T_e, L et r_e.

II.8. On note $P_{cond}(r)$ la puissance thermique associée au phénomène de conduction thermique dans l'isolant, traversant un cylindre de longueur L et de rayon r tel que $r_i \leq r \leq r_e$. Nous allons établir et exploiter le lien entre $P_{th,isolant}$ et $P_{cond}(r)$.

II.8.a. En effectuant un bilan d'énergie interne sur un cylindre de longueur L, de rayons interne r et externe $r + dr$ tels que $r_i \leq r < r + dr \leq r_e$ (avec $dr \ll r$), montrer qu'en régime stationnaire $P_{cond}(r)$ est indépendante de r, soit : $\dfrac{dP_{cond}(r)}{dr} = 0$.

II.8.b. En déduire que : $P_{cond}(r) = P_{th,isolant}$.

BY-NC-SA

II.8.c. Rappeler l'expression de la loi de Fourier relative à la conduction thermique en exprimant le vecteur densité surfacique de flux de conduction thermique $\vec{j}_{cond}(r) = j_{cond}(r)\,\vec{u_r}$ en fonction notamment de la conductivité thermique de l'isolant, λ, supposée uniforme. Exprimer ensuite la puissance thermique associé, $P_{cond}(r)$.

Donnée : en repérage cylindrique : $\overrightarrow{\text{grad}}\,(f(r)) = \dfrac{df(r)}{dr}\,\vec{u_r}$.

II.8.d. Déduire des questions précédentes que : $\dfrac{dT}{dr} = \dfrac{h\,r_e}{\lambda\,r}\,(T_0 - T_e)$.

II.8.e. En déduire l'expression de $T(r)$.

II.8.f. En déduire que : $T_e = T_0 + \dfrac{T_i - T_0}{1 + \dfrac{h\,r_e}{\lambda}\ln\left(\dfrac{r_e}{r_i}\right)}$.

II.9. Montrer que : $\dfrac{P_{th}}{P_{th,isolant}} = \dfrac{1}{x} + \alpha\ln(x)$, avec $x = \dfrac{r_e}{r_i}$ et α à exprimer en fonction de h, r_i et λ.

On envisage deux solutions d'isolation différentes. On donne pour chacune d'elles :
$h = 3,0\,\text{W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$ et $r_i = 2,0$ cm.

— Solution d'isolation n° 1 : l'isolant est du polyuréthane, de conductivité thermique : $\lambda_1 = 0,025\,\text{W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$.
Le graphe de $\dfrac{1}{x} + \alpha\ln(x)$ en fonction de x est représenté sur la figure 11 ci-dessous pour la valeur de α correspondante.

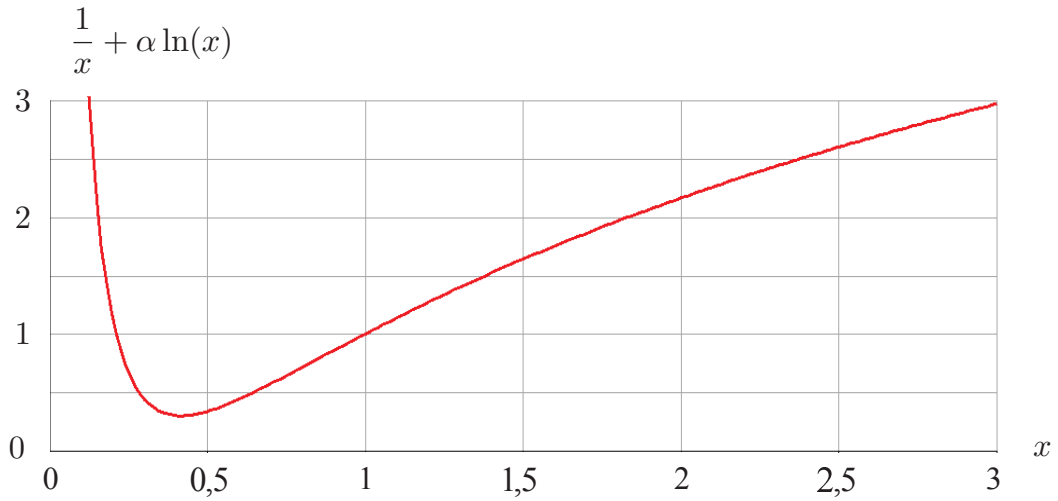


FIGURE 11 – Graphe de la fonction $\dfrac{1}{x}+\alpha\ln(x)$ fonction de x pour la valeur de α du polyuréthane.

— Solution d'isolation n° 2 : l'isolant est du plâtre, de conductivité thermique λ_2.
Le graphe de $\dfrac{1}{x} + \alpha\ln(x)$ en fonction de x est représenté sur la figure 12 (page 16) pour la valeur de α correspondante. L'encart représente un agrandissement pour $0 \leq x \leq 8$.

BY-NC-SA

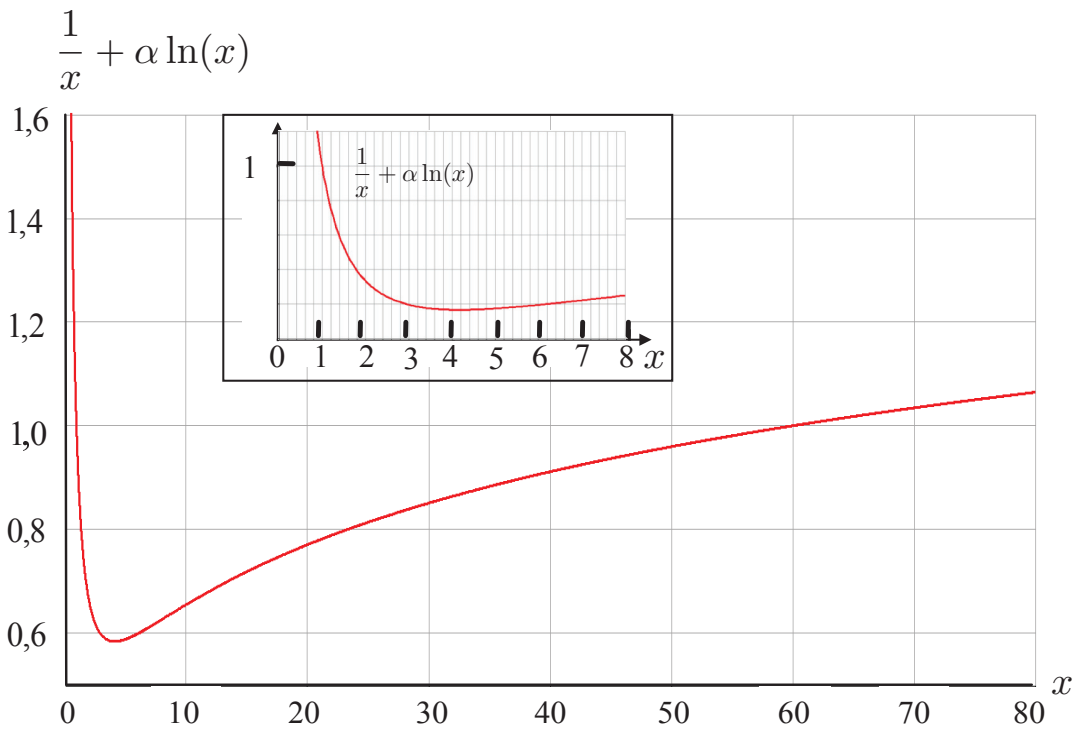


FIGURE 12 – Graphe de la fonction $\frac{1}{x} + \alpha \ln(x)$ fonction de x pour la valeur de α du plâtre.

II.10. En vous appuyant sur les graphes des figures 11 et 12, répondre de façon argumentée aux questions suivantes :

II.10.a. Est-il toujours efficace d'isoler avec du polyuréthane ?

II.10.b. Est-il toujours efficace d'isoler avec du plâtre ? Le cas échéant, déterminer à partir de quelle valeur de r_e l'isolation au plâtre devient efficace et commenter.

II.10.c. Pour quelle valeur x_m de x la fonction $x \to \frac{1}{x} + \alpha \ln(x)$ admet-elle un minimum ?

II.10.d. En déduire la valeur numérique de la conductivité thermique du plâtre λ_2.

Fin de l'énoncé

IMPRIMERIE NATIONALE – 15 1312 – D'après documents fournis

BY-NC-SA