

1 Contrôle de température lors de travaux

Votre entreprise est chargée d'effectuer des travaux de réparation sur un décanteur de station d'épuration, constitué d'une cuve cylindrique en béton de 10m de diamètre intérieur et 2.4m de hauteur, ouverte à l'air libre. Ces travaux (injection de fissures, application d'une résine d'étanchéité sur toute la surface interne) nécessitent une vidange de la cuve, et donc un rejet direct des effluents non traités à la rivière pendant toute leur durée. Pour limiter l'impact environnemental, il est impératif d'effectuer ces travaux en hiver, période au cours de laquelle les cours d'eau sont à leur débit maximum.

La mise en œuvre des produits nécessite une température ambiante minimale de 10°C pendant l'application des produits. La vitesse de durcissement dépend de la température de la résine une fois mise en place.

Vous décidez donc de recouvrir la cuve d'une bâche de polyéthylène, et de chauffer l'intérieur de la cuve au moyen d'un générateur d'air chaud.

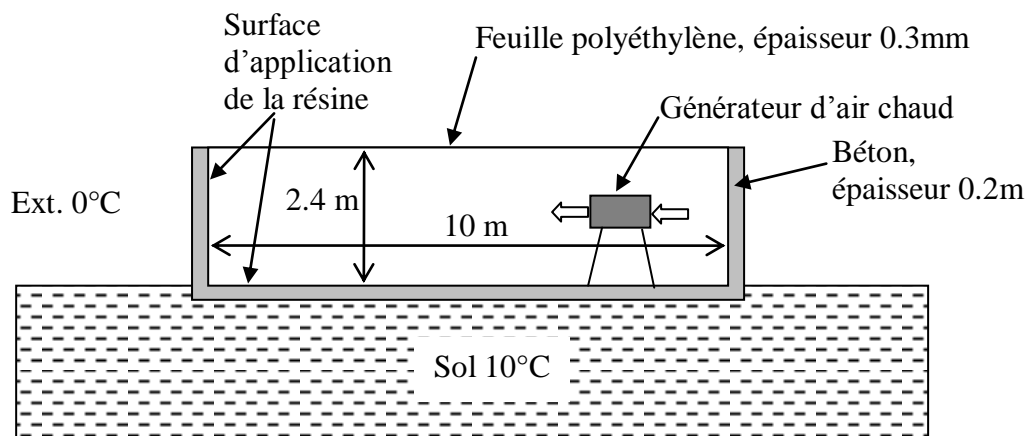


Fig. 1 : schéma de la cuve en phase de travaux

1.1 Dimensionnement du chauffage

Calculer la puissance thermique du générateur d'air chaud, de manière à maintenir une température ambiante intérieure de 10°C, lorsque la température extérieure est de 0°C.

Hypothèses :

- On suppose qu'on est en régime permanent
- On néglige les infiltrations d'air extérieur
- Température du sol uniforme et constante : 10°C
- Résistances superficielles : intérieure : $R_{si}=0.13 \text{ m}^2\text{K/W}$, extérieure : $R_{se}=0.04 \text{ m}^2\text{K/W}$
- On néglige la résistance thermique de la couche de résine d'étanchéité
- $\lambda_{\text{béton}}=1.75 \text{ W/m}^2\text{K}$, $\lambda_{\text{polyéthylène}}=0.2 \text{ W/m}^2\text{K}$,

1.2 Température de surface

A quelle température sera la résine appliquée sur la partie verticale, lors de sa phase de durcissement ?

1.3 Consommation énergétique

Calculer, (en kWh) l'énergie consommée si l'opération dure 5 jours (application + durcissement), alors que la température extérieure reste constante et égale à 0°C .

2 Sollicitations thermiques sur un ouvrage d'art

On étudie le tablier d'un viaduc, constitué d'un caisson métallique rectangulaire dont le modèle simplifié est schématisé Fig. 2. La tôle supérieure du caisson est recouverte d'une épaisseur d'enrobé qui constitue la couche de roulement. On néglige l'influence thermique des raidisseurs métalliques présents à l'intérieur du caisson.

Propriétés des matériaux :

- **enrobé** : $\lambda=2.20 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$, $C=869 \text{ J}/(\text{kg.K})$, $\rho=2300 \text{ kg}/\text{m}^3$,
coefficient de réflexion du rayonnement solaire (albédo) = 0.18
- **acier** : $\lambda=52 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$, $C=465 \text{ J}/(\text{kg.K})$, $\rho=7850 \text{ kg}/\text{m}^3$

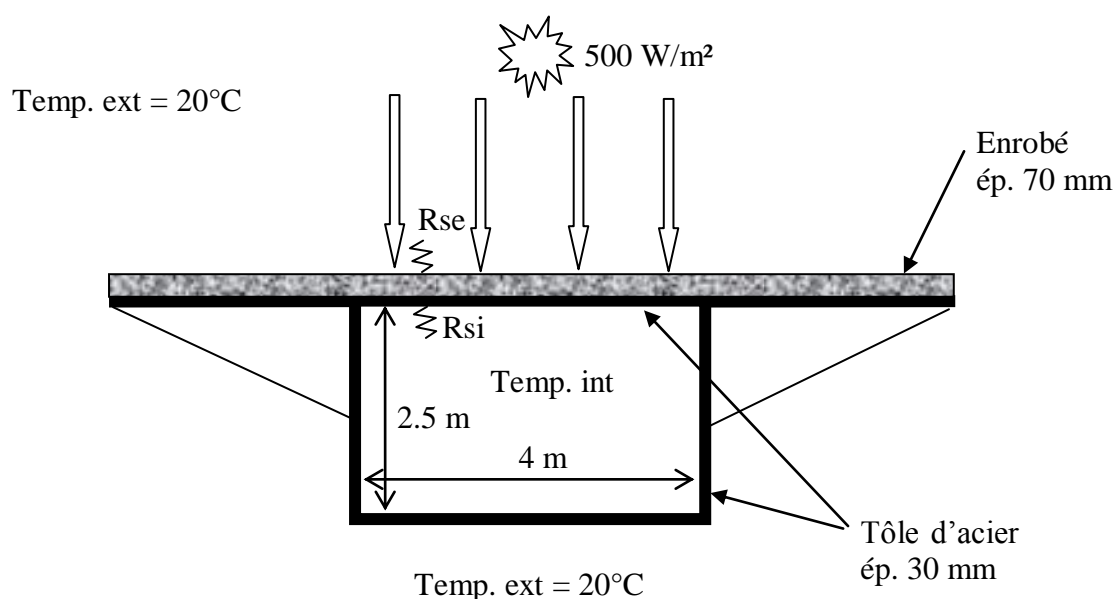


Fig. 2 : coupe du tablier

2.1 Profil de températures

Pendant une période longue, la chaussée reçoit un éclairement solaire incident normal de $500 \text{ W}/\text{m}^2$, dont seule une part de 82% est absorbée par le matériau, le reste étant réfléchi vers le ciel). Etablir le profil de température dans la partie supérieure du caisson (tôle d'acier + enrobé), en supposant le régime permanent atteint. On supposera dans cette question que le caisson est suffisamment ventilé, de sorte que sa température intérieure est égale à la température extérieure. On prendra pour résistances superficielles: $R_{si}=0.13 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ et $R_{se}=0.03 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$

2.2 Equilibre du caisson fermé

On suppose maintenant que le caisson est totalement fermé, et non ventilé. Calculer la température ambiante intérieure, sachant que seule la surface supérieure du tablier reçoit l'éclairement solaire. On prendra sur toutes les surfaces internes : $R_{si}=0.13 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ et sur toutes les surfaces externes : $R_{se}=0.03 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$.

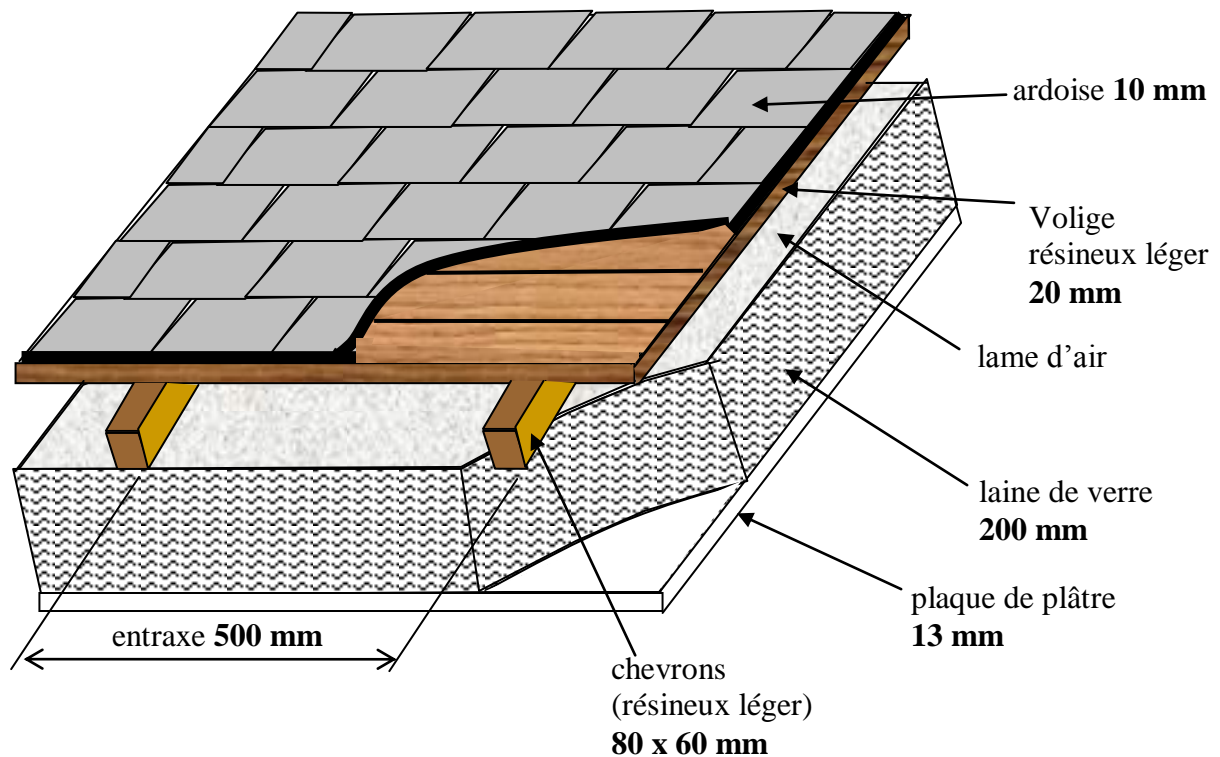
3 Refroidissement de l'eau dans une canalisation

On considère une canalisation d'eau en acier de diamètre extérieur 100 mm, circulant à l'air libre. Cette canalisation est isolée par une coquille de mousse de polyuréthane de 5 cm d'épaisseur ($\lambda=0.036 \text{ W}/(\text{mK})$).

- Calculer le coefficient de transmission linéique ψ , en négligeant la résistance thermique de la paroi en acier, ainsi que de l'échange superficiel eau/acier. La résistance thermique superficielle coté extérieur est : $R_{se}=0.04 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$.
- L'eau est initialement à 10°C dans la canalisation, et son débit est nul. Au bout de combien de temps cette eau atteint-elle la température de 0°C , sachant que la température extérieure est constante et égale à -10°C ?

4 Etude d'une toiture

Une maison d'habitation comporte des combles aménagés dont la toiture a la structure représentée ci-dessous.



4.1 Conditions hivernales nocturnes

- Calculer le coefficient de transmission équivalent U de cette paroi. On considèrera l'espace vide entre chevrons comme une lame d'air non ventilée, de résistance thermique $R=0.13 \text{ m}^2\text{K}/\text{W}$. On supposera pour simplifier que le contact entre ardoises et volige est parfait (résistance thermique de contact nulle). On prendra les valeurs habituelles de la RT 2012 pour les résistances superficielles intérieure et extérieure ($R_{si}=0.1 \text{ m}^2\text{K}/\text{W}$ et $R_{se}=0.04 \text{ m}^2\text{K}/\text{W}$).

- b) Calculer les déperditions d'un pan de toiture de 30m^2 , pour une température intérieure de 19°C , et une température extérieure de 0°C , en l'absence de rayonnement solaire.
- c) Pour les conditions ci-dessus, tracer le profil de température en partie courante de la paroi (au droit de la lame d'air entre chevrons).

4.2 Conditions hivernales, journée ensoleillée

On étudie maintenant le comportement de cette même toiture lors d'une journée ensoleillée du mois de février. La toiture, orientée au sud et inclinée à 45° , reçoit vers midi un éclairement solaire supposé constant et égal à $850\text{W}/\text{m}^2$. On suppose que 100% de ce rayonnement est absorbé par les ardoises. Les températures ambiantes et conditions d'échange sont les mêmes qu'en 4.1.1. On supposera dans toute cette partie que le **régime permanent** est atteint. De même, on négligera l'influence thermique des chevrons.

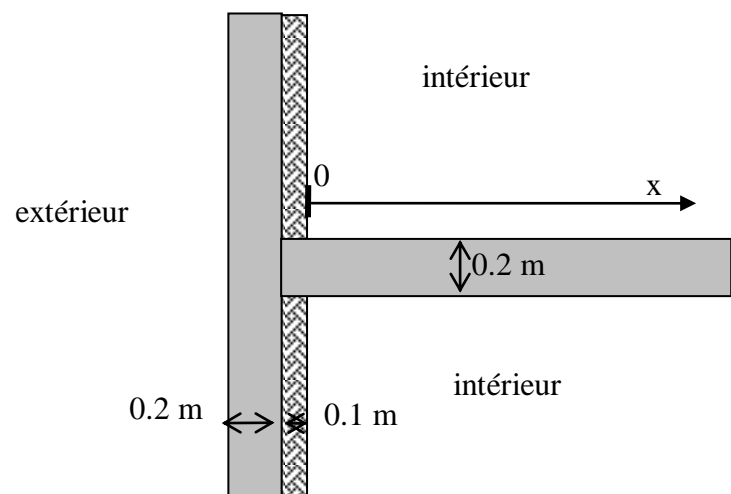
- a) Déterminer la température de la face extérieure des ardoises
- b) Calculer les déperditions (ou apports) du pan de toiture de 30m^2 . Conclure.
- c) Tracer le profil de température en partie courante de la paroi (au droit de la lame d'air entre chevrons). Quelle est la température moyenne de la lame d'air ?

5 Pont thermique

On étudie le pont thermique constitué de la jonction d'un plancher (dalle pleine en béton) avec un mur extérieur (en béton banché).

Données :

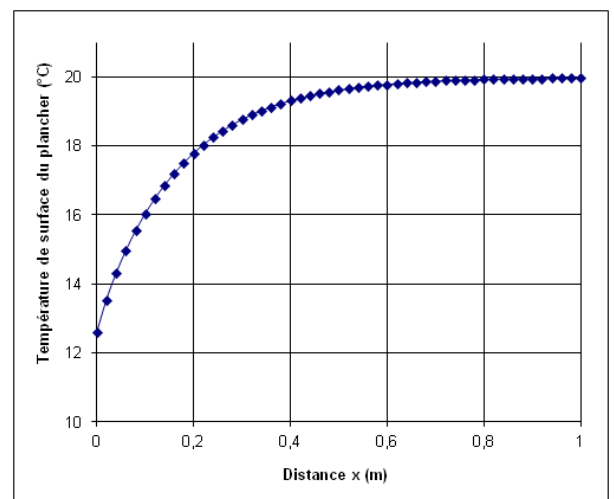
- $\lambda_{\text{béton}} = 2 \text{ W}/\text{mK}$
- $\lambda_{\text{isolant}} = 0.04 \text{ W}/\text{mK}$
- épaisseur plancher = 0.2 m
- épaisseur mur béton = 0.2 m
- épaisseur isolant = 0.1 m
- $R_{\text{se}}(\text{mur}) = 0.04 \text{ m}^2\text{K}/\text{W}$
- $R_{\text{si}}(\text{mur}) = 0.13 \text{ m}^2\text{K}/\text{W}$
- $R_{\text{si}}(\text{plancher}) = 0.13 \text{ m}^2\text{K}/\text{W}$
- Température ambiante intérieure : 20°C
- Température ambiante extérieure : 0°C



Le problème est modélisé par éléments finis, et on obtient, après résolution, la répartition de température de surface du plancher ci-contre :

Valeur moyenne de la température de surface sur l'intervalle $0 \leq x \leq 1$: 18.72°C

A partir de ces résultats, donner une estimation aussi précise que possible du coefficient linéique ψ du pont thermique.



6 Gel d'un réservoir d'eau

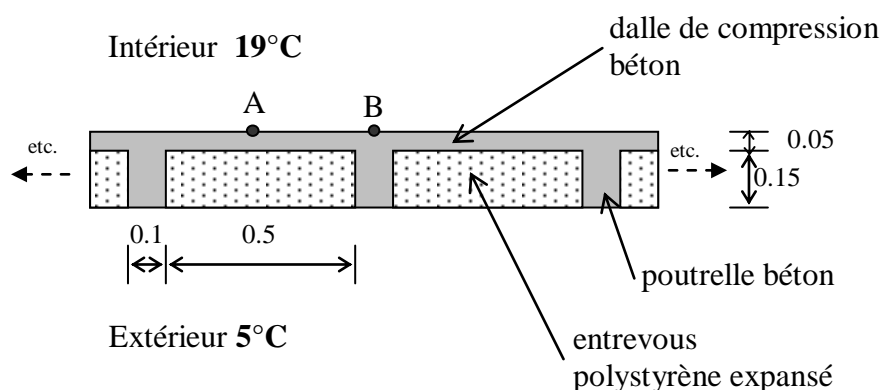
Une cuve cylindrique en acier non isolée (diamètre 1.5m, longueur 2.5m), complètement remplie d'eau, est entreposée sur un chantier pendant une période de froid. La température initiale de l'eau stockée est de 5°C, la température extérieure moyenne annoncée par la météorologie nationale pour les jours à venir est de -5°C. Vous semble-t-il raisonnable de stocker cette cuve pleine à l'extérieur pendant la durée d'un week-end (65 heures), sachant que le risque d'éclatement apparaît dès que 10% de la masse d'eau a gelé ? On néglige la résistance superficielle du contact eau/acier, ainsi que la résistance thermique de l'acier de la cuve. La résistance superficielle à la surface extérieure de la cuve est de 0.04m²K/W.

Rappel : chaleur latente de fusion de la glace $L_f = 334 \text{ kJ/kg}$.

7 Plancher à entrevous isolants

On étudie un plancher de bâtiment constitué de poutrelles en béton, d'entrevous en polystyrène expansé (pleins), et d'une dalle de compression en béton.

Dans cet exercice, on étudiera le schéma simplifié suivant, en considérant que le flux de chaleur est en tout point perpendiculaire au plan du plancher :



On donne :

- résistance thermique superficielle sur la face supérieure : 0.17 m².K/W
- résistance thermique superficielle sur la face inférieure : 0.04 m².K/W
- conductivité thermique du béton : 2 W/(m.K)
- conductivité thermique du polystyrène expansé : 0.043 W/(m.K)

- Calculer le coefficient de transmission surfacique équivalent U de ce plancher,
- Déterminer, pour les températures indiquées, le flux traversant un tel plancher, d'une surface de 50 m². Calculer l'énergie traversant ce plancher pendant une journée.
- Déterminer les températures sur la surface supérieure du plancher, au droit d'un entrevous (point A), puis au droit d'une poutrelle (point B)
- Tracer les profils de températures dans les deux parties (au droit de A et B).
- Quelle méthode utiliseriez-vous pour étudier exactement le transfert thermique dans ce plancher ? Représenter le modèle, et les conditions aux limites. Représenter intuitivement l'allure des lignes isothermes réelles.

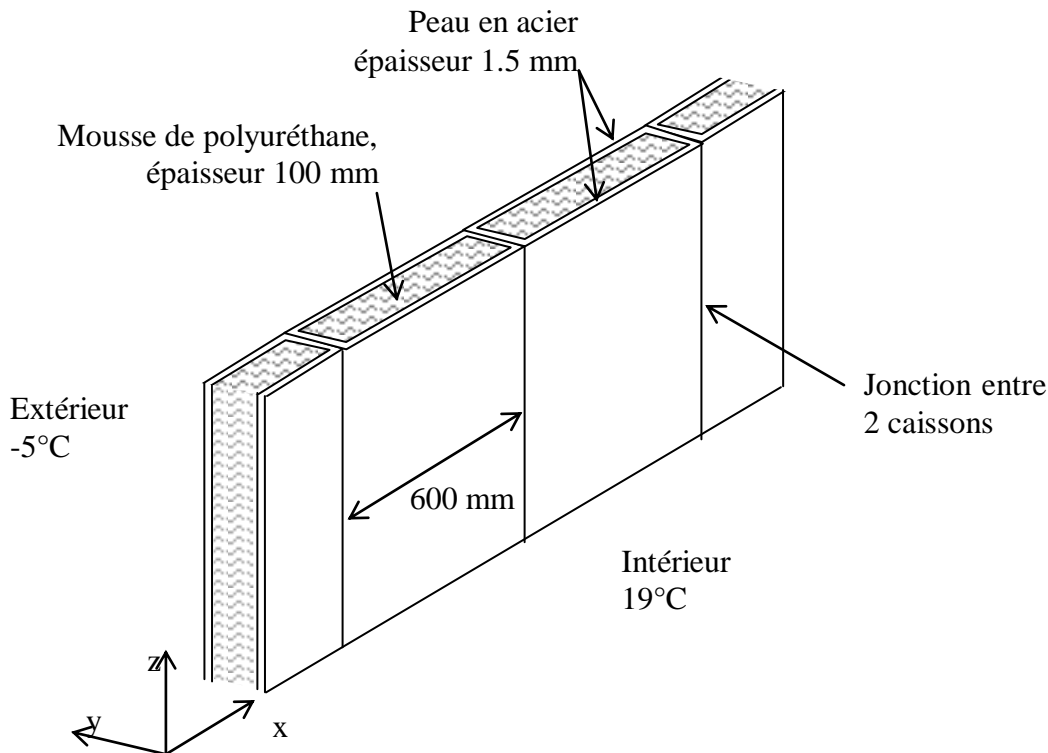
8 Tuyauterie de chauffage

Un local industriel est chauffé par un tube cylindrique en acier parcouru par de l'eau chaude. On donne les caractéristiques suivantes :

- Diamètre extérieur du tube : 40 mm
 - Epaisseur de la paroi du tube : 2 mm
 - Conductivité thermique de l'acier : $\lambda=52 \text{ W/(m.K)}$
 - Résistances superficielles :
 - Eau /surface intérieure du tube : $R_{si} = 6 \times 10^{-4} \text{ m}^2.\text{K/W}$
 - Surface extérieure du tube / ambiance : $R_{se} = 0.05 \text{ m}^2.\text{K/W}$
 - Coefficient de transmission linéique du tube : $\psi = 2.48 \text{ W/(m.K)}$
 - Température ambiante du local : 15°C
 - Température de l'eau à l'entrée du tube : 90°C
 - Débit de l'eau : $1.2 \text{ m}^3/\text{h}$
 - Longueur du tube : 120 m
 -
- a) Retrouver par un calcul exact la valeur du coefficient de transmission linéique ψ du tube donnée ci-dessus.
- b) Calculer la température de l'eau à la sortie du tube, et la puissance thermique émise.
- c) Pour les mêmes conditions de débit, quelle devrait être la température d'entrée d'eau pour assurer une puissance thermique de 10 kW ?
- d) Si l'on suppose que la température de l'eau dans une partie du tube est initialement de 80°C , et que le débit devient nul, calculer le temps au bout duquel l'eau dans cette partie du tube sera refroidie jusqu'à la température de 25°C . On prendra les hypothèses suivantes :
- température ambiante constante et égale à 15°C ,
 - capacité calorifique de la paroi en acier du tube négligée,
 - coefficient de transmission inchangé.

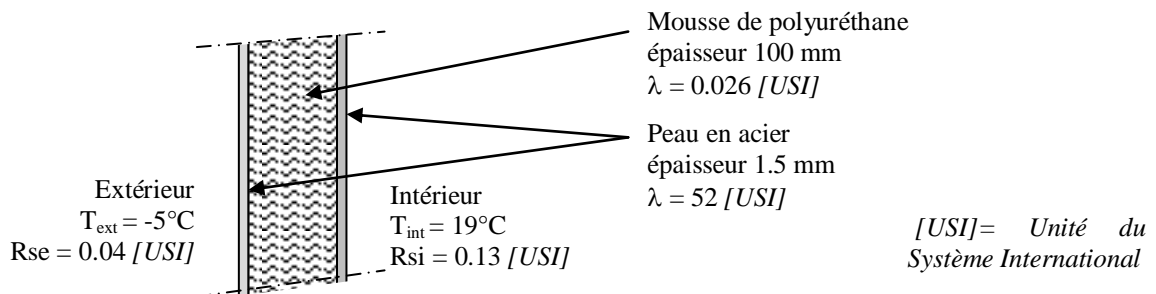
9 Enveloppe d'un bâtiment industriel

La paroi extérieure d'un bâtiment industriel est constituée de caissons en tôle d'acier de faible épaisseur (peau), remplis de mousse de polyuréthane. On va étudier le problème du pont thermique constitué par la liaison entre deux caissons.



9.1 Etude de la paroi en partie courante

La partie courante de la paroi (en dehors des zones de jonction entre caissons) peut être représentée de la manière suivante :



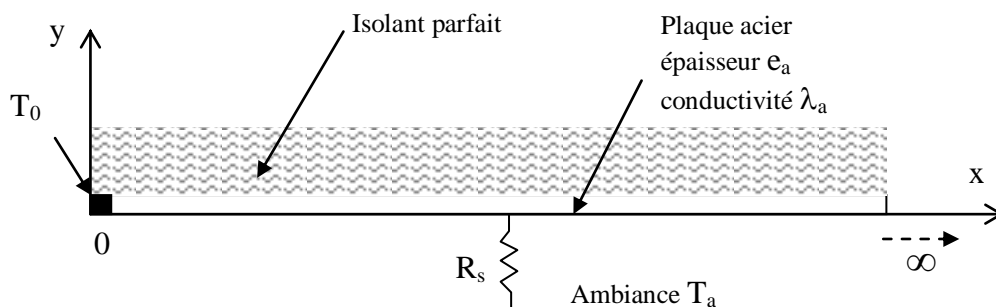
Pour cette paroi, calculer :

- le coefficient de transmission thermique surfacique U ,
- le flux surfacique échangé,
- la température des peaux en acier, coté intérieur et coté extérieur,
- l'énergie échangée pendant 24 heures à travers 100 m^2 de cette paroi (exprimer le résultat en $[\text{USI}]$, puis en kWh)

9.2 Etude théorique et démonstrations

Une plaque en acier est en contact avec une ambiance à la température T_a , avec une résistance superficielle R_s sur une de ses faces ($y=0$), et **parfaitement isolée** sur l'autre face ($y=e_a$). La plaque est infiniment longue suivant la direction z , et suivant $x>0$. La température

de l'acier suivant une ligne $x=0$ est imposée à la valeur T_0 . On considère que la température de l'acier est constante sur toute l'épaisseur e_a , à une abscisse x donnée.



- Représenter par des flèches sur le schéma les différents flux de chaleur échangés dans ce dispositif : densité surfacique de flux échangée entre l'ambiance et la peau en acier, flux transmis par conduction dans l'acier
- Démontrer** que la répartition de température de l'acier le long de la plaque est donnée par l'expression :

$$T(x) = T_a + (T_0 - T_a) \cdot \exp\left(-\frac{1}{\sqrt{\lambda_a e_a R_s}} x\right)$$

- Démontrer** que le flux linéique de chaleur dans la plaque (par unité de longueur suivant z) est, en $x=0$:

$$\varphi_l = \sqrt{\frac{\lambda_a e_a}{R_s}} (T_0 - T_a)$$

- Application numérique
En prenant les valeurs suivantes :

$$e_a = 1.5 \text{ mm}$$

$$\lambda_a = 52 \text{ [USI]}$$

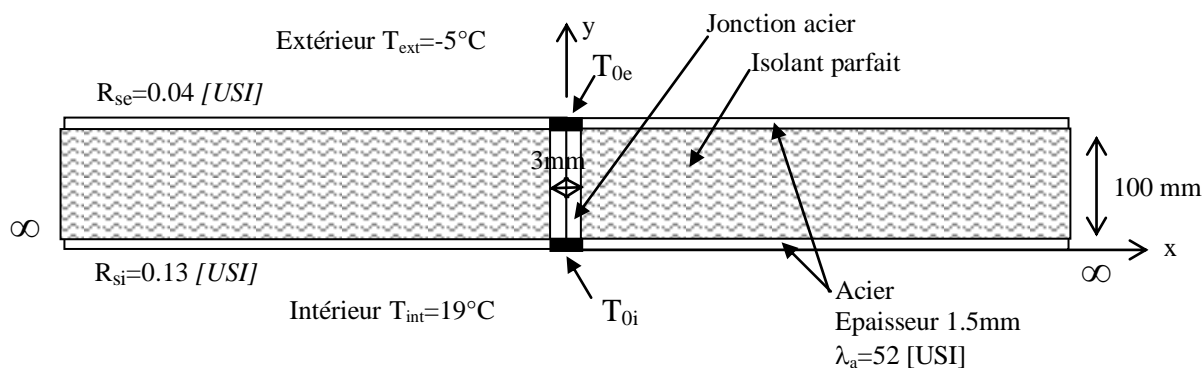
$$R_s = 0.04 \text{ [USI]}$$

$$T_0 = 10^\circ\text{C}, T_a = 0^\circ\text{C}$$

Calculer la température de la plaque à l'abscisse $x=0.3$ m, et le flux linéique en $x=0$.

9.3 Etude d'un pont thermique

Les caissons sont assemblés comme l'indique la coupe horizontale ci-dessous :

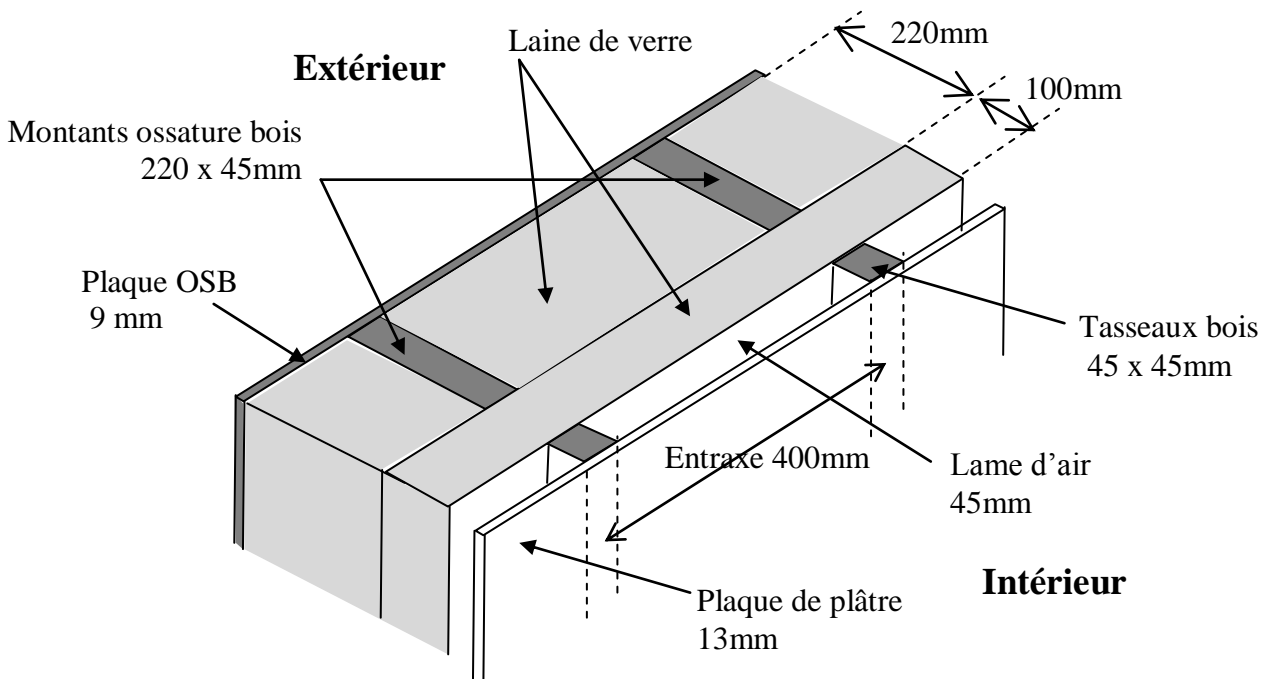


- Représenter par des flèches sur le schéma les différents flux de chaleur échangés dans ce dispositif : densités surfaciques de flux échangées entre les ambiances et les peaux en acier, flux transmis par conduction dans l'acier

- b) En effectuant des bilans de flux adéquats, calculer les températures T_{0i} et T_{0e} des peaux en acier, au droit de la jonction entre panneaux. On pourra s'aider de l'expression du flux donnée à la question 2.2.2.
- c) En déduire le flux traversant le pont thermique constitué par la jonction entre panneaux
- d) En déduire le coefficient linéique de transmission ψ du pont thermique constitué par la jonction
- e) Si la largeur des panneaux est de 600 mm, calculer le coefficient U_e équivalent du mur, intégrant les ponts thermiques.

10 Mur à ossature bois

Le mur à ossature bois d'un bâtiment à basse consommation est constitué d'une ossature en montants de bois équidistants de 400 mm. L'espace entre montants est rempli de laine de verre. Une couche supplémentaire de laine de verre de 100mm vient recouvrir l'ensemble (voir figure ci-dessous).



Données complémentaires :

Conductivités thermiques :

- OSB : $\lambda = 0.13 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$
- Bois : $\lambda = 0.15 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$
- Laine de verre : $\lambda = 0.035 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$
- Plaque de plâtre : $\lambda = 0.25 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$

Résistance thermique d'une lame d'air de 45 mm : $R = 0.16 \text{ m}^2.\text{K}.\text{W}^{-1}$

Résistances superficielles :

- intérieure : $R_{si} = 0.13 \text{ m}^2 \cdot \text{K} \cdot \text{W}^{-1}$
- extérieure : $R_{se} = 0.04 \text{ m}^2 \cdot \text{K} \cdot \text{W}^{-1}$

10.1 Coefficients de transmission thermique

- Calculer les coefficients de transmission thermique U de cette paroi :
 - en partie courante (il s'agit de la partie où il n'y a pas d'ossature bois),
 - au droit de l'ossature bois
- En déduire le coefficient de transmission U équivalent de la paroi hétérogène

10.2 Déperditions

Un bâtiment présente une surface totale de ce type de murs égale à 300 m^2 . Calculer le flux de chaleur total traversant ce mur lorsque la température intérieure est de 19°C , et la température extérieure de -8°C . Quelle est l'énergie perdue par ce mur pendant 24 heures, avec ces conditions de température ?

10.3 Profil de température

Calculer, et tracer le profil de température dans la partie courante de cette paroi, lorsque la température intérieure est de 19°C et la température extérieure de -8°C .

11 Isolation d'un BALLON DE STOCKAGE D'EAU CHAUDE

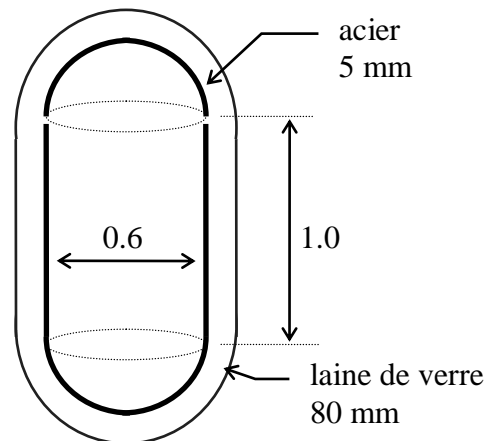
On considère le ballon d'eau chaude représenté ci-dessous, composé d'une paroi cylindrique en acier (diamètre intérieur 60 cm, hauteur 1 m, épaisseur 5 mm) et de deux extrémités hémisphériques de même épaisseur. Ce ballon est isolé par 8 cm de laine de verre sur toute sa surface extérieure. Ce ballon contient de l'eau à 55°C . La température ambiante extérieure est de 15°C .

Conductivités thermiques :

- acier : $\lambda = 52 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$
- laine de verre : $\lambda = 0.041 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$

Résistances superficielles :

- eau-acier : $R_{si} = 0.7 \times 10^{-4} \text{ m}^2 \cdot \text{K} \cdot \text{W}^{-1}$
- isolant-air ext. : $R_{se} = 0.05 \text{ m}^2 \cdot \text{K} \cdot \text{W}^{-1}$



11.1 Calcul approché :

Calculer le coefficient de transmission surfacique U de la paroi du ballon, en assimilant celle-ci à une paroi plane. En déduire une estimation du flux de chaleur traversant cette paroi, la résistance thermique globale approximative du ballon, et son coefficient de déperdition global approximatif H (W/K).

11.2 Calcul exact :

Calculer exactement la résistance thermique globale du ballon, en tenant compte des formes réelles (cylindrique et sphérique) de la paroi. En déduire le coefficient de déperdition par transmission H (W/K).