

3. Etude du rendement

a. Rendement théorique maximal:

Le rendement μ d'une PAC est le rapport de deux transferts d'énergie : celui qui est utile, compte tenu de la vocation de la machine, sur celui qui est dépensé pour la faire fonctionner.

$$\mu_{\text{MAX}} = \frac{Q_c}{W} = \frac{T_c}{T_c - T_f}$$

Q_c = quantité de chaleur fournie à la source chaude

Q_f = quantité de chaleur perdue par la source froide

W = travail fourni par la PAC

T_c = température de la source chaude (K)

T_f = température de la source froide (K)

b. Rendement réel :

Le travail fourni par le compresseur est :

$$W = P \cdot \Delta t$$

P = puissance absorbée par le compresseur = 136W environ dans notre expérience.

Δt = durée pendant laquelle la température de la source chaude a varié de ΔT_c

Or la quantité de chaleur Q_c cédée par le fluide à la source chaude est :

$$Q_c = m \cdot C_{\text{eau}} \cdot \Delta T_c$$

C_{eau} = capacité calorifique massique de l'eau = $4,19 \cdot 10^3 \text{ J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$

m = masse d'eau

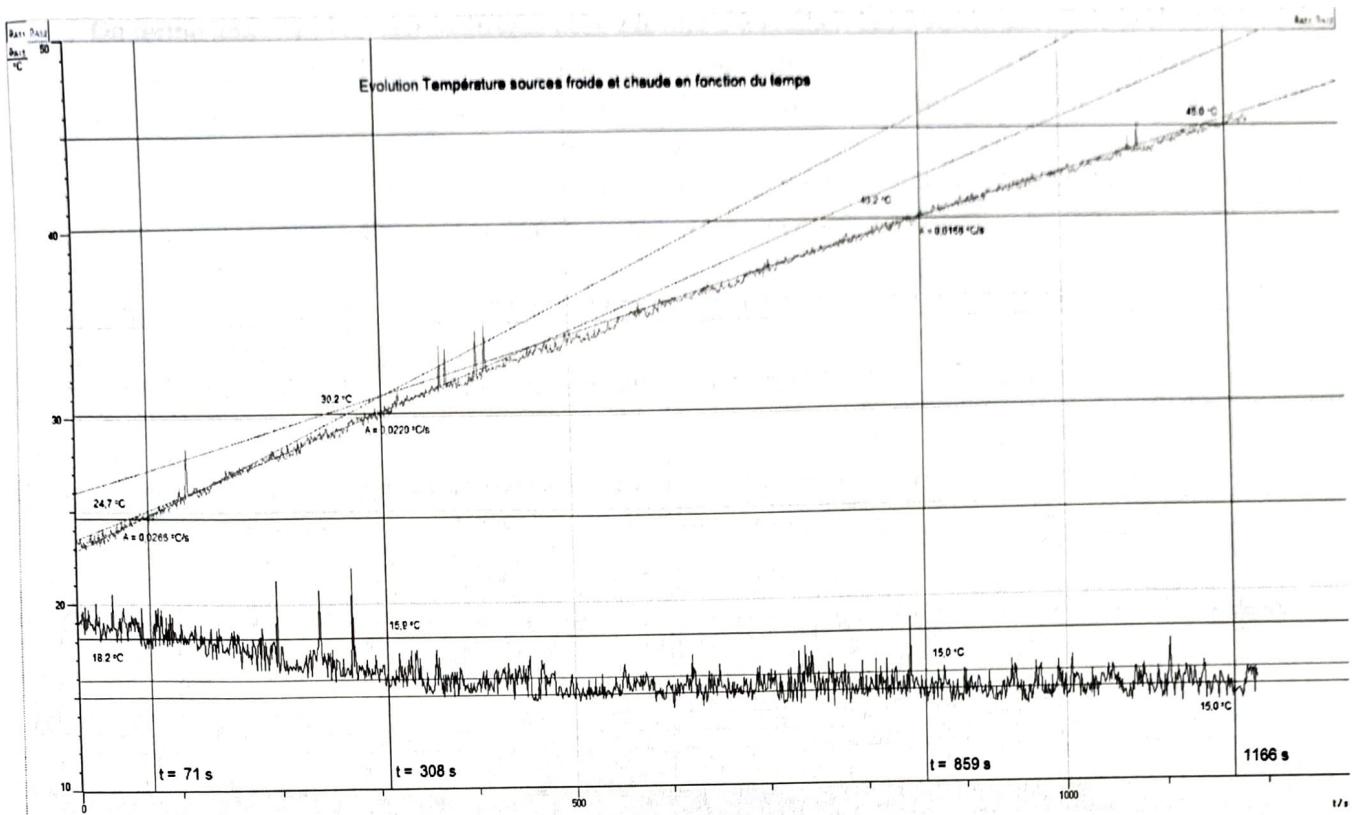
Le rendement réel est donc :

$$\mu_{\text{réel}} = \frac{Q_c}{W} = \frac{M \cdot C_{\text{eau}} \cdot \Delta T_c}{P \cdot \Delta t} = \frac{m \cdot C_{\text{eau}}}{P} \cdot \frac{dT}{dt}$$

$\frac{dT}{dt}$ étant la pente à un instant t de la courbe $T_c = f(t)$

Par exemple, une efficacité thermique de 3 pour une pompe à chaleur signifie qu'elle restitue 3 fois plus d'énergie qu'elle n'en consomme.

4. Résultats :



ΔT_c (K)	6,5	14,3	25,2
μ_{\max}	46	21	12
$\mu_{\text{réel}}$	3.3	2.7	2.0

On constate que l'efficacité thermique réelle est bien inférieure à l'efficacité maximale théorique. En effet, une partie de l'énergie électrique consommée par le compresseur est « perdue » sous forme de chaleur (le compresseur chauffe), ainsi que lors du cycle compression-détente du fluide caloporteur, et n'est pas entièrement restituée à la source chaude.

2ième partie : Mesure de la résistance thermique d'une paroi

1. But :

Le but de ce TP est de déterminer la résistance thermique d'un « mur » constitué de plaques de différentes matières. On déterminera ainsi la conductivité thermique de chaque matière.

2. Principe

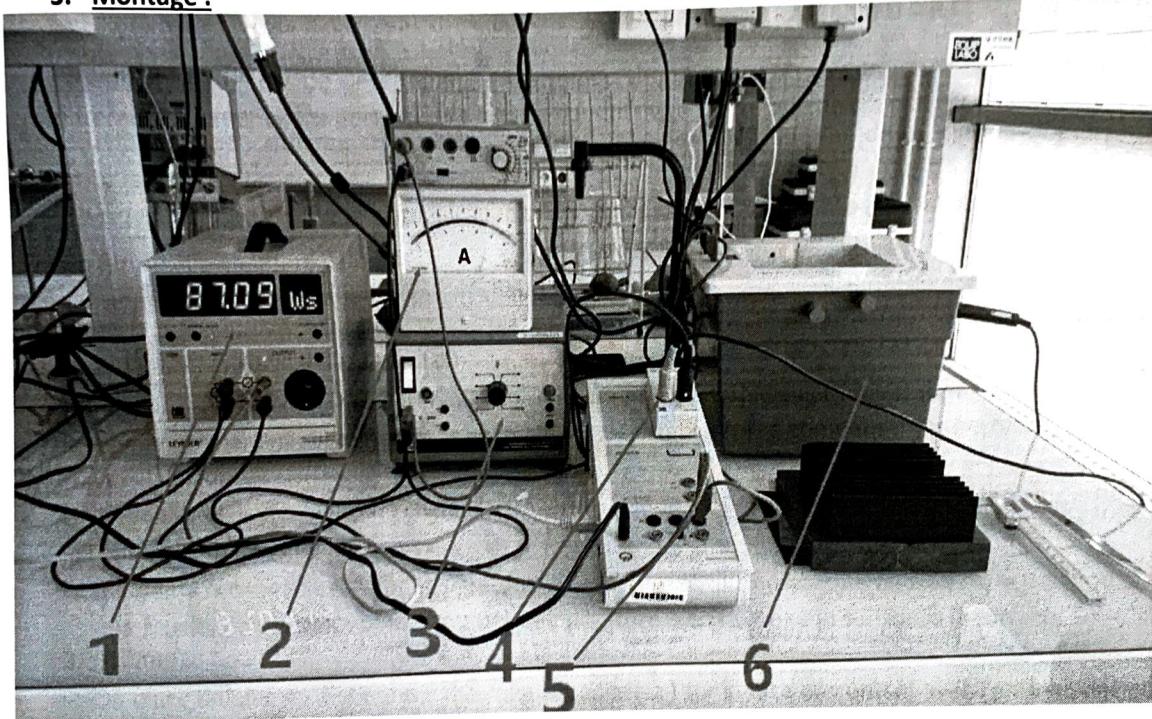
On ferme une chambre calorimétrique avec « le mur » à étudier. Les 5 autres parois de la chambre sont considérées comme adiabatiques. On chauffe, à l'aide d'une résistance, l'intérieur de la chambre et on attend le régime permanent, pour lequel la température intérieure (et donc la différence de température entre l'intérieur et l'extérieur) est constante.

On mesure alors, pendant un intervalle de temps connu, l'énergie électrique E apportée pour maintenir le régime permanent. Or l'énergie apportée par la résistance sert à compenser les pertes de chaleur Q à travers la plaque.

On peut alors calculer le flux de chaleur à travers la plaque qui constitue « le mur » étudié puis en déduire la résistance thermique R_{th} .

Le même travail est fait avec différentes plaques et un classement est effectué.

3. Montage :



1. Joulemètre : permet de mesurer l'énergie nécessaire à compenser les « fuites » à travers la plaque en régime permanent.
2. Ampèremètre : permet de vérifier que le courant dans le circuit est inférieur à 1A (courant max que peut supporter le relai)
3. Alimentation : fournit l'énergie nécessaire au chauffage de la chambre calorimétrique.
4. Sondes de températures reliée à l'interface d'acquisition : l'une d'elles mesure la température à l'intérieur de la chambre, et l'autre à l'extérieur (air ambiant).
5. Le relai : c'est un interrupteur qui est tantôt fermé (mis en marche du chauffage, lorsque $\theta_{int} < 40^\circ\text{C}$), tantôt ouvert (arrêt du chauffage lorsque $\theta_{int} > 40^\circ\text{C}$), il permet donc de réguler une température de 40°C à l'intérieur de la chambre calorimétrique.
6. Chambre calorimétrique.

4. Théorie :

a) Expression de la loi de Fourier : Rappeler ce que représente chaque grandeur et donner son unité.

dQ : quantité de chaleur qui traverse une surface S pendant une durée dt .

$\frac{d\theta}{dx}$: Gradient de température le long de l'axe Ox ;

λ : coefficient de diffusion thermique

b) Définir le flux thermique Φ et son unité.

$\Phi = \frac{dQ}{dt}$ Donc son unité est le $J.s^{-1}$ soit le W

$R_{th} = \frac{\theta_2 - \theta_1}{\Phi}$ donc s'exprime en $K.s.J^{-1}$

Cas du mur : Montrer que l'expression de la loi de FOURIER en régime permanent pour le mur devient

dans ce cas $\Phi = \lambda S \frac{\theta_1 - \theta_2}{x_2 - x_1}$

On a $\Phi = -\lambda S \frac{d\theta}{dx} = -\lambda S \frac{\Delta\theta}{\Delta x} = -\lambda S \frac{\theta_2 - \theta_1}{x_2 - x_1} = \lambda S \frac{\theta_1 - \theta_2}{x_2 - x_1}$

c) Qu'appelle-t-on résistance thermique, notée R_{th} ? Donner son expression pour le mur.

La résistance thermique est le coefficient de proportionnalité entre le flux thermique et la différence de température : $\theta_2 - \theta_1 = R_{th} \cdot \Phi$. Remarquer l'analogie avec la loi d'ohm $U = R \cdot I$!

Pour le mur, elle s'exprime par : $R_{th} = \frac{1}{\lambda} \cdot \frac{e}{s}$

d) Quelle aptitude du mur mesure-t-elle ? De quelles caractéristiques de la plaque dépend cette résistance ?

La résistance thermique mesure la capacité du mur à résister au passage de la chaleur.

e) Unité de R_{th} ?

$R_{th} = \frac{\theta_2 - \theta_1}{\Phi}$ donc s'exprime en $K.W^{-1}$

5. Manipulation et exploitation (exemple : bâche piscine)

Manipulations :

- On ferme la chambre calorimétrique avec la première paroi. Sur chaque face de cette paroi on place une feuille d'aluminium pour avoir une température bien homogène sur toute la surface.
- On place de plus un dissipateur thermique (radiateur) sur la face en contact avec l'air ambiant pour faciliter l'échange de chaleur avec l'air.
- On règle la température ($40^\circ C$) à l'intérieur de la chambre grâce au logiciel « Mesure et Commande » qui commande le relais.
- Au bout d'un certain temps, la température se stabilise et le chauffage devient intermittent et périodique de période environ 1 mn.
- On mesure l'énergie électrique consommée pendant une durée Δt égale à environ une dizaine de périodes. Ici, on a pris $\Delta t = 11mn15s = 675$ s
- Le joulemètre nous donne l'énergie $E = Q = 1,191 \cdot 10^3$ J

Calcul de la résistance thermique :

- On calcule alors le flux de chaleur à travers la paroi : $\phi = \frac{E}{\Delta t} = \frac{1191}{675} = 1,76W$
- On déduit alors la résistance thermique $R_{th} = \frac{\theta_2 - \theta_1}{\phi} = \frac{40 - 22}{1,76} = 10,2 K.W^{-1}$

Calcul de la conductivité thermique λ .

- On a $R_{th} = \frac{1}{\lambda} \cdot \frac{e}{S}$ donc $\lambda = \frac{1}{R_{th}} \cdot \frac{e}{S} = \frac{1}{10,2} \cdot \frac{0,005}{0,0225} = 0,022 W.K^{-1}.m^{-1}$

6. Résultats:

	t(s)	épaisseur (m)	surface (m²)	T° amb (°C)	T° int (°C)	Q (J)	flux (W)	Rth (K/W)	λ (W/K/m)
P1 (PVC)	720	0,005	0,0225	23	40	1492,00	2,07	8,20	0,027
P2 (piscine)	675	0,005	0,0225	22	40	1191,00	1,76	10,20	0,022
P3 (polystyrène)	600	0,028	0,0225	22,2	40	909,00	1,52	11,75	0,106
P4 (styrodur)	600	0,01725	0,0225	22,3	40	890,00	1,48	11,93	0,064

- Pour classer les plaques de la moins isolante à la plus isolante, il faut considérer la résistance thermique de chaque plaque.

Plus une plaque est isolante, plus sa résistance thermique est grande.

On a ainsi :

$$P1 (\text{PVC}) < P2 (\text{piscine}) < P3 (\text{polystyrène}) < P4 (\text{styrodur})$$

Mais ce classement tient compte des dimensions des plaques et donc de leur épaisseur.

- Pour classer ensuite les matières de la moins isolante à la plus isolante, il faut alors considérer la conductivité thermique de chaque matière.

Plus une matière est isolante, plus sa conductivité thermique est faible.

On a ainsi :

$$P3 (\text{polystyrène}) < P4 (\text{styrodur}) < P1 (\text{PVC}) < P2 (\text{piscine})$$

- Comment réaliser une bonne isolation, c'est-à-dire obtenir une bonne résistance thermique ?

Ce problème est délicat. A priori, on pourrait se dire qu'il faut faire un mur constitué du même matériau que la bâche de piscine, et le plus large possible !

Le problème, c'est qu'il y a des contraintes de résistances mécaniques, d'encombrement, de confort, d'esthétique, et de coût.

Donc, le plus souvent, pour réaliser une bonne isolation, on associe des plaques de différentes matières pour obtenir un mur qui satisfait à toutes ces contraintes. Ce n'est alors plus un « mur simple »...

3^{ème} partie : Application à un cas réel : bilan thermique d'une piscine

1. Cas n°1 : la piscine est découverte et chauffée électriquement

a. Calcul du flux issu du transfert convectif entre l'eau et l'air :

$$\phi_1 = h \cdot S \cdot (T_1 - T_2) = 10 \times 24 \times (28 - 15) = 3120W$$

b. Calcul du flux issu du transfert conductif à travers les parois :

$$\phi_2 = \lambda \cdot S \cdot \frac{T_1 - T_3}{e_2} = 1,75 \times 57 \times \frac{28 - 10}{0,15} = 11970W$$

c. Calcul de la quantité d'énergie totale nécessaire au maintien de la température :

Calcul du flux total perdu :

$$\phi_{total} = \phi_1 + \phi_2 = 15050W$$

Quantité d'énergie correspondante :

$$Q_{total} = \phi_{total} \times 10h \times 30j = 4527kW/h$$

Coût correspondant = $4527 \times 0.122 = 552 \text{ €/mois}$

2. Cas n°2 : la piscine est couverte par une bâche et chauffée électriquement

a. Calcul du flux issu du transfert conductif à travers la bâche :

$$\phi_1 = \lambda \cdot S \cdot \frac{T_1 - T_2}{e_1} = 0.022 \times 24 \times \frac{28 - 15}{0.005} = 1373W$$

b. Calcul du flux issu du transfert conductif à travers les parois :

Comme précédemment, $\phi_2 = 11970W$

c. Calcul de la quantité d'énergie totale nécessaire au maintien de la température :

$$\phi_{total} = \phi_1 + \phi_2 = 13343W$$

$$Q_{total} = \phi_{total} \times 10h \times 30j = 4003kW.h$$

Coût correspondant = $4003 \times 0.122 = 488 \text{ €/mois}$

3. Cas n°3 : la piscine est couverte par une bâche et chauffée par une PAC

Comme précédemment, le flux total perdu est de 13343W.

Si on considère un rendement de la PAC égal à 2,5 :

$$Q_{total} = \frac{\phi_{total} \times 10h \times 30j}{2,5} = 1601kW.h$$

Soit un coût = $1601 \times 0.122 = 195 \text{ €/mois}$

Calcul de la résistance thermique :

On calcule alors le flux de chaleur à travers la paroi : $\phi = \frac{E}{\Delta t} = \frac{1191}{675} = 1,76 \text{ W}$

On déduit alors la résistance thermique $R_{th} = \frac{\theta_2 - \theta_1}{\phi} = \frac{40 - 22}{1,76} = 10,2 \text{ K.W}^{-1}$

Calcul de la conductivité thermique λ .

On a $R_{th} = \frac{1}{\lambda} \cdot \frac{e}{S}$ donc $\lambda = \frac{1}{R_{th}} \cdot \frac{e}{S} = \frac{1}{10,2} \cdot \frac{0,005}{0,0225} = 0,022 \text{ W.K}^{-1}.m^{-1}$

6. Résultats:

	t(s)	épaisseur (m)	surface (m^2)	T° amb (°C)	T° int (°C)	Q (J)	flux (W)	Rth (K/W)	λ (W/k/m)
P1 (PVC)	720	0,005	0,0225	23	40	1492,00	2,07	8,20	0,027
P2 (piscine)	675	0,005	0,0225	22	40	1191,00	1,76	10,20	0,022
P3 (polystyrène)	600	0,028	0,0225	22,2	40	909,00	1,52	11,75	0,106
P4 (styrodur)	600	0,01725	0,0225	22,3	40	890,00	1,48	11,93	0,064

- Pour classer les plaques de la moins isolante à la plus isolante, il faut considérer la résistance thermique de chaque plaque.

Plus une plaque est isolante, plus sa résistance thermique est grande.

On a ainsi :

$$P1 (\text{PVC}) < P2 (\text{piscine}) < P3 (\text{polystyrène}) < P4 (\text{styrodur})$$

Mais ce classement tient compte des dimensions des plaques et donc de leur épaisseur.

- Pour classer ensuite les matières de la moins isolante à la plus isolante, il faut alors considérer la conductivité thermique de chaque matière.

Plus une matière est isolante, plus sa conductivité thermique est faible.

On a ainsi :

$$P3 (\text{polystyrène}) < P4 (\text{styrodur}) < P1 (\text{PVC}) < P2 (\text{piscine})$$

- Comment réaliser une bonne isolation, c'est-à-dire obtenir une bonne résistance thermique ?

Ce problème est délicat. A priori, on pourrait se dire qu'il faut faire un mur constitué du même matériau que la bâche de piscine, et le plus large possible !

Le problème, c'est qu'il y a des contraintes de résistances mécaniques, d'encombrement, de confort, d'esthétique, et de coût.

Donc, le plus souvent, pour réaliser une bonne isolation, on associe des plaques de différentes matières pour obtenir un mur qui satisfait à toutes ces contraintes. Ce n'est alors plus un « mur simple »...