

ARNAUD Vincent
ZHANG Xunjie
MEZACHE Yedhir

TP Transferts thermiques 1 : L' échangeur à tubes concentriques

Introduction:

Un échangeur à tubes concentriques est un dispositif permettant de transférer de l' énergie thermique d' un fluide vers un autre sans les mélanger.

Le flux thermique traverse la surface d' échange, tube en métal dans notre cas, qui sépare les fluides, qui sont de l' eau chaude et froide.

Voici une image du dispositif:



On observe ici le débit mètre de l' eau chaude (en bas à droite) ainsi que les tubes de l' échangeur dans lequel il y a l' eau froide et l' eau chaude.



On observe ici les valeurs des températures aux différents capteurs (en haut à droite) ainsi que le débitmètre de l' eau froide (en bas à droite) et le raccordement de l' eau froide (gauche).

Voici les réponses aux questions à se poser afin de mieux comprendre le TP.

1) L'eau chaude s'écoule en circuit fermé, afin de limiter la puissance de chauffe nécessaire au fonctionnement de l'installation.

L'eau chaude contenue dans un réservoir à l'intérieur du module de commande/mesure est chauffée à température constante puis est entraînée en

écoulement à travers l'échangeur.

Un débitmètre est installé afin de pouvoir contrôler son débit avant son injection dans l'échangeur.

À la sortie de l'échangeur, l'eau chaude est ramenée au réservoir.

2) Comme il est difficile de refroidir de l'eau dans le réservoir d'un circuit fermé, l'eau froide

s'écoule en circuit ouvert (nous n'avons fait aucune modification sur sa température d'entrée).

L'installation est raccordée au robinet de l'évier qui devra être ouvert tout au long de l'expérience.

La pression du réseau est suffisante pour faire circuler l'eau froide dans l'échangeur.

Un limiteur de pression (non visible) permet d'éviter une surpression dans le circuit et un débitmètre permet de contrôler son débit.

L'eau froide est injectée au même niveau que l'eau chaude.

À la sortie de l'échangeur un tuyau de vidange ramène l'eau froide dans l'évacuation de l'évier.

3) L'eau chaude circule dans le tube intérieurs

4) Il est co-courant, les 2 fluides vont dans le même sens et sont parallèles.

Pour inverser la situation il faudra inverser le mouvement de l'eau chaude vis à vis de l'eau froide (ou inversement).

5) L'unité est : débits.

6) Il ne faut pas donner une consigne de température supérieure à 70°C sinon l'interrupteur de thermocouple (sonde de température) ferait disjoncter l'installation.

7) Les tubes de l'échangeur sont entourés de mousse pour une question d'isolation afin de ne pas avoir de transfert de chaleur avec l'extérieur.

8) On peut changer le nombre de Reynolds en faisant varier le débit d'eau chaude mais sans changer le débit d'eau froide.

Le nombre de Prandtl est quand à lui changé en faisant varier le débit d'eau froide tout en conservant un nombre de Reynolds constant.

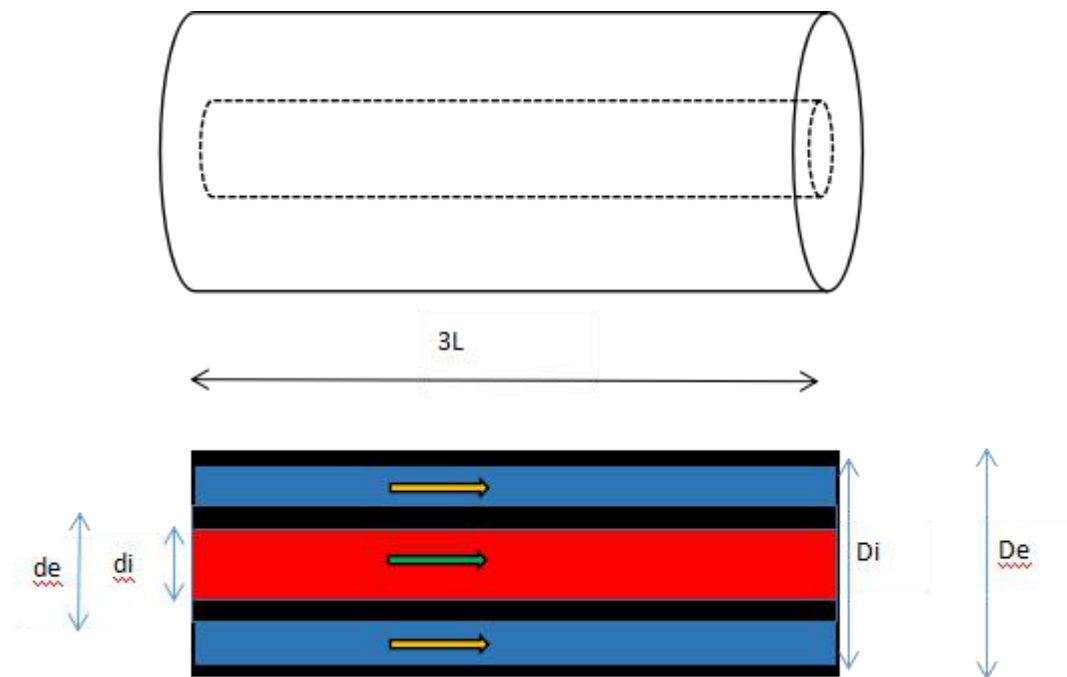
9) Il faut attendre que les températures se stabilisent car le fluide chaud se refroidit au contact du fluide froid

et le fluide froid se réchauffe au contact du fluide chaud jusqu'à ce que l'équilibre thermique entre les deux milieux soit obtenu.

C'est à dire, il faut être en régime permanent pour pouvoir exploiter nos résultats.

Théorique : transferts de chaleur dans l'échangeur

Voici un schéma simplifié de notre échangeur :



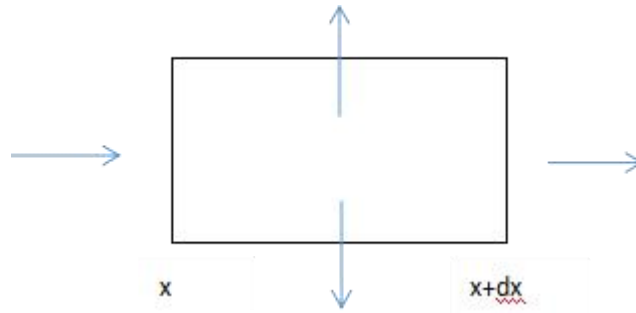
L'équation d'équilibre d'énergie .

On note dS un élément de surface . m_c et m_f est le débit massique du fluide chaud et du fluide froid. C_f et C_c est la capacité calorifique massique du fluide chaud et du fluide froid. On note T_c et T_f les températures du fluide chaud et du fluide froid . Ainsi que Q_c et Q_f les flux de chaleur paroi / fluide chaud et flux de chaleur paroi / fluide froid. Et on écrit l'équation d'équilibre:

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} = -\rho C_p \nabla(uT) + \nabla(\vec{q})$$

C'est un problème stationnaire donc il est indépendant du temps .

$$0 = -\rho C_p \int_v \nabla \cdot (uT) dv + \int_v \nabla \cdot \vec{q} dv$$



Donc pour un fluide chaud on trouve la relation suivante :

$$0 = -\rho C_{pc}(-u_c S_c)T(x) - \rho C_{pc}(u_c S_c)T(x+dx) - h(T_c - T_f)S$$

On a encore une relation dérivée :

$$T(x+dx) = T(x) + \frac{\partial T}{\partial x}(x)dx + \sigma(dx^2)$$

On trouve :

$$\frac{dT_f}{dx} = -\left(\frac{2hR\pi}{m_c C_p}\right)(T_c - T_f)$$

On trouve la même fonction dans le fluide chaud , et on fait la différence :

$$\frac{d}{dx}(T_c - T_f) = -2\pi h R \left(\frac{1}{m_c C_c} - \frac{1}{m_f C_f} \right)$$

Au final on trouve l'expression :

$$T_c - T_f = \alpha e^{-\beta x}$$

Où :

$$\alpha = T_c(0) - T_f(0) \quad \beta = 2\pi h R \left(\frac{1}{m_c C_c} - \frac{1}{m_f C_f} \right)$$

Dans la séance de TP :

$$\alpha = \Delta T_e$$

Pour la sortie , à $x=L$:

$$T_c(3L) - T_f(3L) = \alpha e^{-3L\beta}$$

$$-3L\beta = \ln\left(\frac{T_c(3L) - T_f(3L)}{T_c(0) - T_f(0)}\right) = \ln\frac{\Delta T_s}{\Delta T_e}$$

Grace aux données de l'énoncé, on introduit :

$$\theta_{\ln} = \frac{\Delta T_e - \Delta T_s}{\ln \frac{\Delta T_e}{\Delta T_s}}$$

Ainsi que :

La température moyenne logarithmique entre paroi et fluide froid :

$$\theta_{\ln}^f = \frac{\Delta T_e - \Delta T_s}{\ln \frac{\Delta T_s}{\Delta T_e}} = \frac{T_p^e - T_f^e - (T_p^s - T_f^s)}{-3\beta L} \quad \Delta T = T_p - T_f$$

La température moyenne logarithmique entre fluide chaud et paroi :

$$\theta_{\ln}^c = \frac{\Delta T_e - \Delta T_s}{\ln \frac{\Delta T_s}{\Delta T_e}} = \frac{T_c^e - T_p^e - (T_c^s - T_p^s)}{-3\beta L} \quad \Delta T = T_c - T_p$$

La température moyenne logarithmique entre fluide chaud et fluide froid :

$$\theta_{\ln} = \frac{\Delta T_e - \Delta T_s}{\ln \frac{\Delta T_s}{\Delta T_e}} = \frac{T_c^e - T_f^e - (T_c^s - T_f^s)}{-3\beta L} \quad \Delta T = T_c - T_f$$

On peut montrer également que :

$$\theta_{\ln}^f + \theta_{\ln}^c = \frac{T_p^e - T_f^e - (T_p^s - T_f^s)}{-3\beta L} + \frac{T_c^e - T_p^e - (T_c^s - T_p^s)}{-3\beta L} = \frac{T_c^e - T_f^e - (T_c^s - T_f^s)}{-3\beta L} = \theta_{\ln}$$

On cherche l'expression théorique du flux de chaleur Q :

$$\begin{aligned} Q &= \int_0^{3L} h (T_c(x) - T_f(x)) 2\pi R dx \\ &= 2\pi R h \alpha \left[\frac{e^{\beta x}}{\beta} \right]_0^{3L} \\ &= 6\pi R h L \frac{T_c(3L) - T_f(3L) - T_c(0) + T_f(0)}{\ln \frac{T_c(3L) - T_f(3L)}{T_c(0) - T_f(0)}} \end{aligned}$$

$$= 6\pi R h L \theta_{\ln}$$

On cherche les relations entre hf hc et H par conservation du heat flux :

$$\frac{1}{H} = \frac{1}{h_c} + \frac{1}{h_f} + \frac{d_e - d_i}{\lambda}$$

Pout lambda , vous pouvez le trouve dans l'annexe

Si on néglige l' épaisseur de la paroi :

$$\frac{1}{H} = \frac{1}{h_c} + \frac{1}{h_f}$$

On fait les calcules d'aires :

Aire concerné	symbole	formule	valeur	unité
Aire interne du petit tube	Ai	$\pi \cdot d_i \cdot 3L$	0.026	m ²
Aire externe du petit tube	Ae	$\pi \cdot d_e \cdot 3L$	0.031	m ²
Aire moyenne	Am	$(A_i + A_e)/2$	0.0285	m ²
Section chaude	Sc	$\pi \cdot d_i^2 / 4$	49	mm ²
Section froide	Sf	$\pi \cdot (D_i^2 - d_e^2) / 4$	36	mm ²

Θ (Temp. Logarithmique)	A	B	C	Total
Θ_f				13.378374
Θ_c				1.741141302
Θ	27.10587831	13.66537036	6.493448629	15.18348571
Flux de Chaleurs				
Q_f	951.5	478.5	258.5	1688.5
Q_c	-848	-494.6666667	-424	-1766.666667
h_c	39025.38977			
h_f	4207.038412			
H	366.991371			

De part nos résultats et nos connaissances, nous pouvons en déduire que lorsque le débit d' eau chaude va diminuer, le coefficient d' echange de chaleur va aussi diminuer aussi bien pour l' eau chaude que pour l' eau froide.

Nusselt nombre , Reynolds nombre et Prandtl nombre par des grandeurs mesurables :

$$\text{Pr} = \frac{\nu}{\alpha}$$

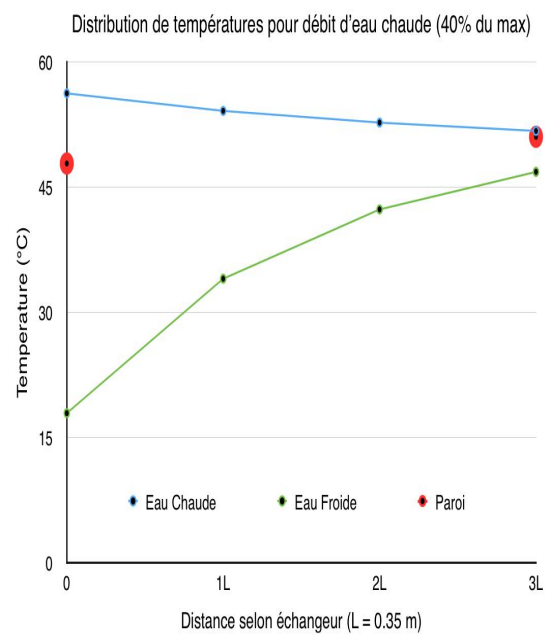
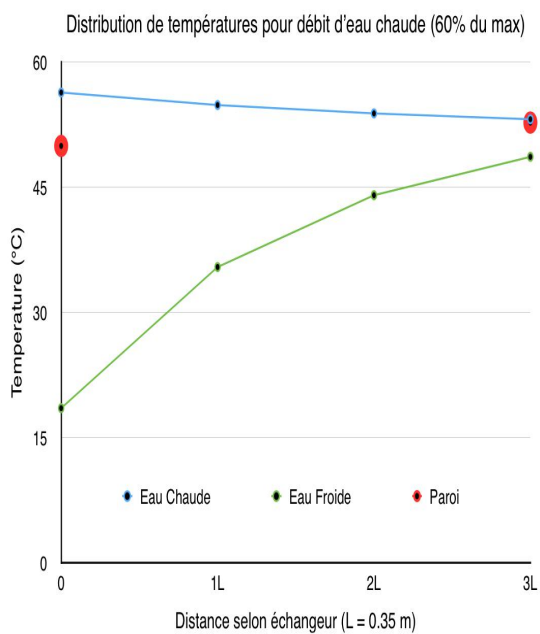
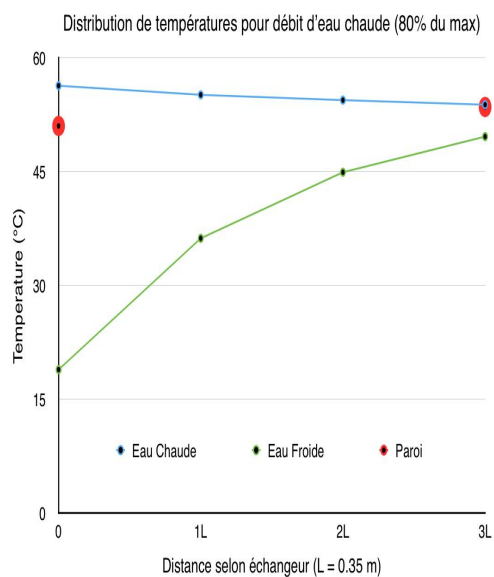
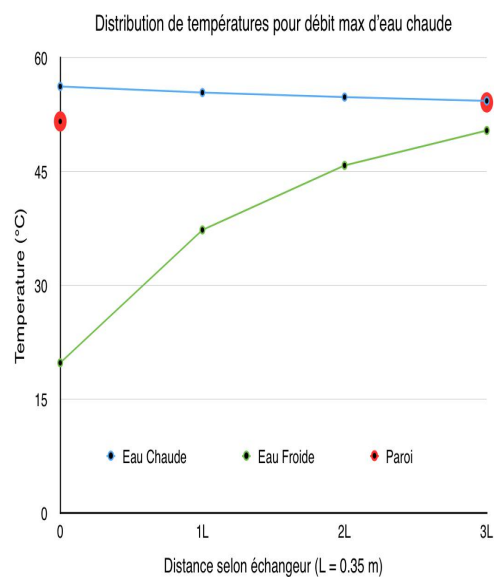
$$\text{Nu} = \frac{hl}{\lambda}$$

$$\text{Re} = \frac{Ul}{\nu}$$

ν est la viscosité cinématique , α est diffusivité thermique , λ est conductivité thermique , h est le coefficient de transfert thermique .

Analyse détaillée et globale :

	Eau Chaude	Eau Froide	Paroi
0	56.2	19.8	51.6
1L	55.4	37.3	
2L	54.8	45.8	
3L	54.3	50.4	54.1
80%			
0	56.3	18.9	51
1L	55.1	36.2	
2L	54.4	44.9	
3L	53.8	49.6	53.5
60%			
0	56.3	18.5	49.9
1L	54.8	35.4	
2L	53.8	44	
3L	53.1	48.6	52.7
40%			
0	56.2	17.9	47.8
1L	54.1	34	
2L	52.7	42.3	
3L	51.7	46.8	51



Expérience à Pr constant : influence du nombre de Re

La prise des mesures s'effectue à des points bien précis (cf image d'introduction).

Expériences à Pr constant: Influence du nombre de Re					
Debit froid (g/s)	11	11	11	11	
Debit chaud (L/min)	10	8	6	4	
5	51.6	51	49.9	47.8	° C
6	54.1	53.5	52.7	51	
7	56.2	56.3	56.3	56.2	
8	55.4	55.1	54.8	54.1	
9	54.8	54.4	53.8	52.7	
10	54.3	53.8	53.1	51.7	
11	19.8	18.9	18.5	17.9	
12	37.3	36.2	35.4	34	
13	45.8	44.9	44	42.3	
14	50.4	49.6	48.6	46.8	

D'après nos mesures, la température du fluide chaud ne varie pas (de l'ordre de 56.3 °C).

L'expérience nous montre bien une augmentation de la température du fluide froid au position 12-13-14 pour un même débit d'eau chaude.

De même, on observe bien une diminution de la température à la position 12 (valide aussi pour les positions 13 et 14) quand le débit d'eau chaude diminue.

Calcul de Re pour un débit d'eau chaude de 8L/min:

$$Re = \frac{\rho V D}{\mu} = \frac{985(1.33 \times 10^{-4})(1.1 \times 10^{-3})}{500 \times 10^{-6} \times 36.63 \times 10^{-6}} \approx 7900$$

On obtient, d'après la même formule:

Re pour un débit de 10L/min = 9480

Re pour un débit de 6L/min = 5688

Re pour un débit de 4L/min = 3912

Expérience à Re constant:

Expériences à Re constant	Re 7900		
Température (° C)	55	45	
Débit chaud (L/min)	8	8.8	
Debit froid (g/s)	11	10	
5	51	41.9	° C
6	53.5	43.9	
7	56.3	45.6	
8	55.1	44.9	
9	54.4	44.4	
10	53.8	44.1	
11	18.9	17.4	
12	36.2	31	
13	44.9	37.6	
14	49.6	41	

Pour avoir un Re constant égale 7900 , nous avons joué sur le débit d' eau chaude ,d' eau froide et la température de l' eau chaude .

On constate l' augmentation de la température de l'eau froide dans les deux cas durant sa migration dans le tube.

Pour 45°C (température de l'eau chaude) :

$$V = \frac{\mu Re}{\rho D} = \frac{(560 \times 10^{-6})(7900)}{990 \times 1.1 \times 10^{-3}} = 4.06 \frac{m}{s}$$

$$Debit = 4.06 \times 6 \times 0.36 = 8.77 \frac{L}{min}$$

Pour 35°C (température de l'eau chaude) :

$$V = \frac{\mu Re}{\rho D} = \frac{(700 \times 10^{-6})(7900)}{994 \times 1.1 \times 10^{-3}} = 6.53 \frac{m}{s}$$

$$Debit = 6.53 \times 6 \times 0.36 = 14.34 \frac{L}{min}$$

Impossibilité d'avoir un débit d'eau chaude de 14.34 L/min via les appareils à notre disposition (max est de 10 L/m) .

Il aurait fallu prendre un débit initial pour le calcul de notre Re de référence plus bas (de l'ordre de 4 L/min)

Conclusion:

Dans cette séance de TP , on a étudié le flux dans les tubes d' un échangeur. Pour la partie théorique on c' est rapproché de ce que l' on a fait dans le TD pour mieux comprendre le TP. Pour la partie expérimental , on a utilisé un dispositif bien précis: l' échangeur à tubes concentriques , qui a une paroi (dont l' epaisseur existe) entre le flux chaud et froid. On mesure les températures pour l'eau chaude , l'eau froide et la paroi dans les deux cas (Re constant et Pr constant) . De plus nous avons constaté que les résultats obtenus grace à l'échangeur sont dépendants de la température , viscosité , surface de contact , ainsi que le débit de fluide .

Annexe :

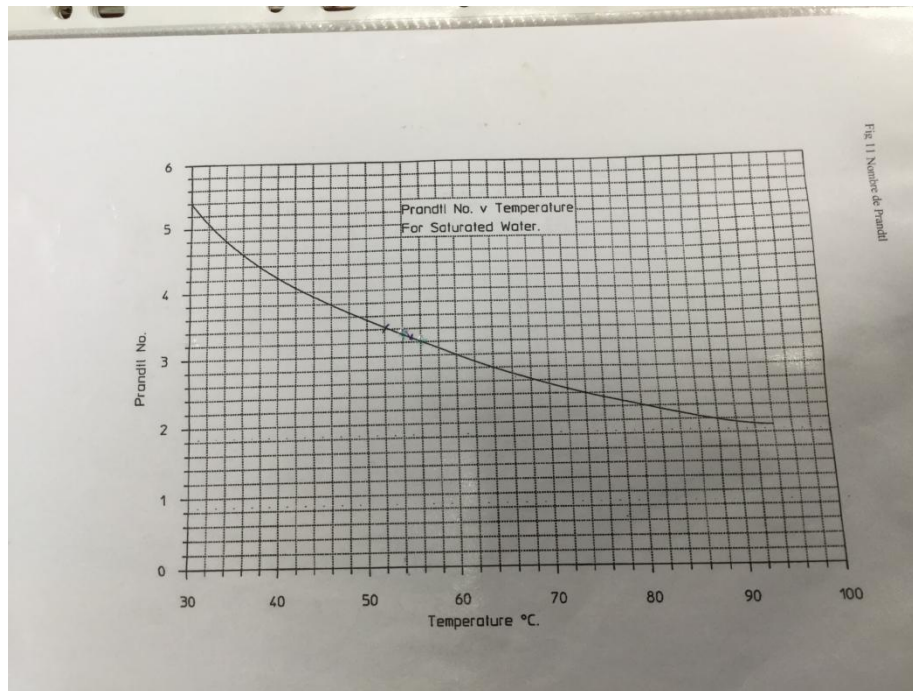


Figure 1 : Pr suivant la température

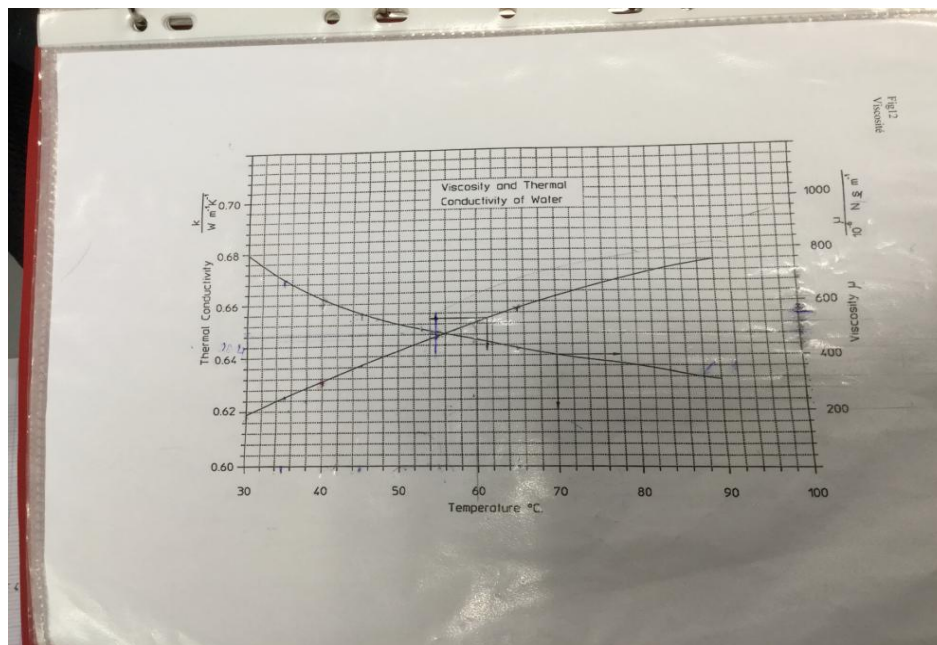


Figure 2 : thermal conductivity et viscosité de l'eau suivant la température

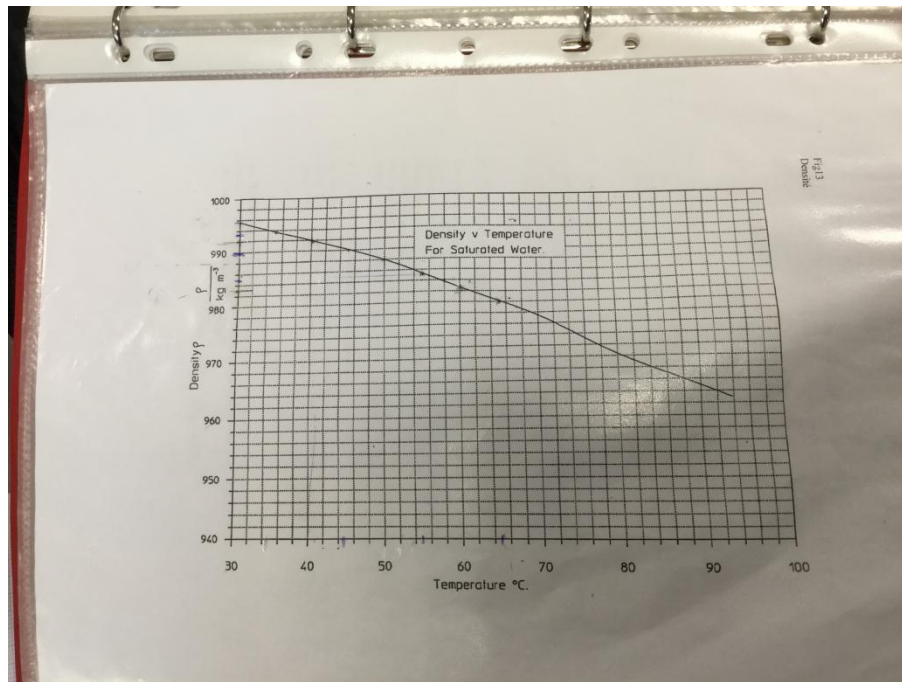


Figure 3 : density de l' eau suivant la température