

Travaux pratiques échangeur de chaleur

Dahia Chibouti

dahia.chibouti@univ-eiffel.fr

2022 – 2023

Table des matières

1	Introduction et rappels théoriques	2
2	Description du dispositif expérimental	2
2.1	Nomenclature	4
2.2	Echangeurs	6
3	Description du dispositif expérimental	6
3.1	Recommandations	6
3.2	Mise en route	6
3.2.1	Circuit d'eau froide	6
3.2.2	Circuit d'eau chaude	7
3.3	Utilisation	8
3.3.1	Étude de l'échangeur à plaques	8
3.3.2	Étude de l'échangeur multitubulaire	9
3.3.3	Arrêt	10
3.4	Réglage du groupe de chauffe	10
4	Dossier théorique : Transfert de la chaleur entre deux fluides séparés par une paroi en régime permanent	10
4.1	Bilan thermique	11
4.2	Coefficient d'échange global	12
4.2.1	Paroi plane	12
4.2.2	Tube cylindrique	12
4.3	Différence moyenne de température	13
4.4	Coefficient d'échange local	13
4.4.1	Échangeur à serpentin	14
4.4.2	Échangeur tubulaire	14

5	Travail à mener	15
5.1	Échangeur multitubulaire	16
5.1.1	Montage contre-courant	16
5.1.2	Montage co-courant	17
5.2	Échangeur à plaques	17
5.3	Commentaires et analyses libres	17

1 Introduction et rappels théoriques

Lorsqu'une différence de température apparaît entre deux points d'un système, un échange de chaleur ou transfert thermique tend à les égaliser. Dans les échangeurs de chaleur, on recherche :

- le maximum d'énergie calorique transmise par unité de surface (efficacité du transfert de chaleur),
- à protéger le plus efficacement possible une installation contre les pertes ou les gains thermiques.

La chaleur peut se transmettre par trois phénomènes différents :

- la conduction : dans un matériau solide, la chaleur passe du point le plus chaud vers le point le plus froid, dans toutes les directions, sans déplacement de particules.
- la convection : le déplacement des particules d'un fluide sert de support au transfert de chaleur. Ils peuvent être :
 - libres ou naturels, ce qui correspond à un déplacement induit par inhomogénéités thermiques,
 - forcés lorsque l'écoulement est forcé mécaniquement à se déplacer, par exemple par une pompe.
- le rayonnement : tout corps émet des radiations visibles ou non. Ces radiations peuvent être absorbées ou engendrées par un autre corps sur la trajectoire de propagation, ce qui modifie l'énergie interne et donc la température.

Ces divers mécanismes de transfert de chaleur interviennent de façon couplée, mais avec des intensités très variables.

2 Description du dispositif expérimental

Le dispositif expérimental est présenté aux Fig. 1 et 2 et les circuits des réseaux chauds et froids des échangeurs à plaques et multitubulaire aux Fig. 3.

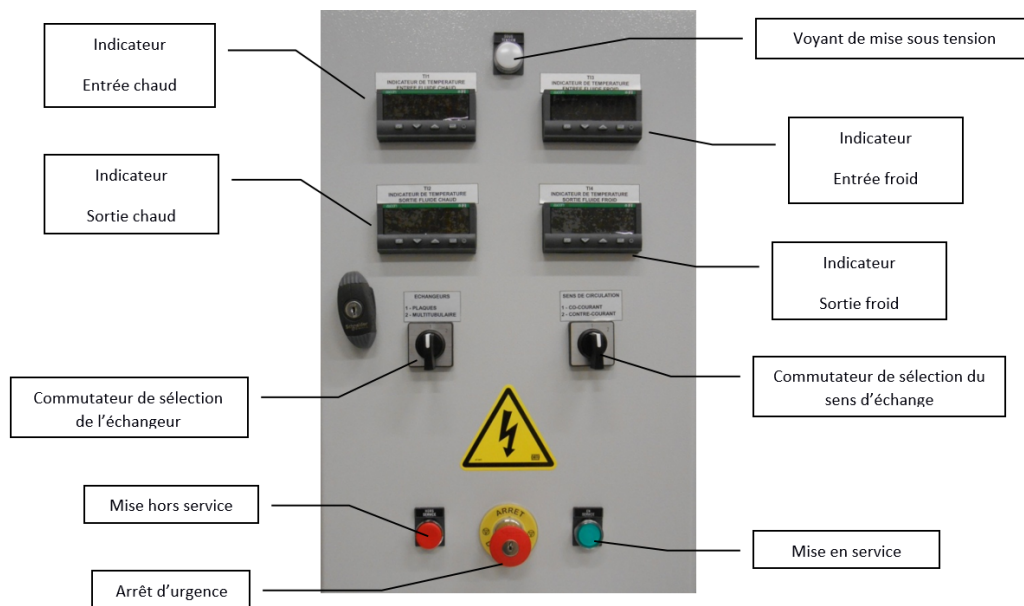


FIGURE 1 – Banc expérimental de la machine frigorifique

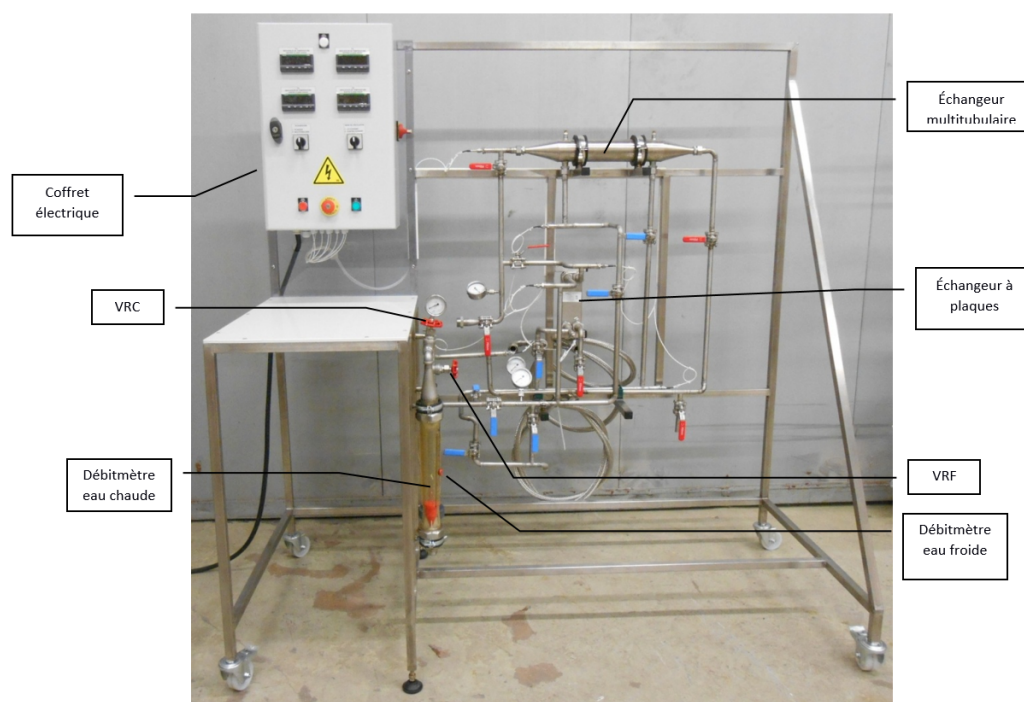
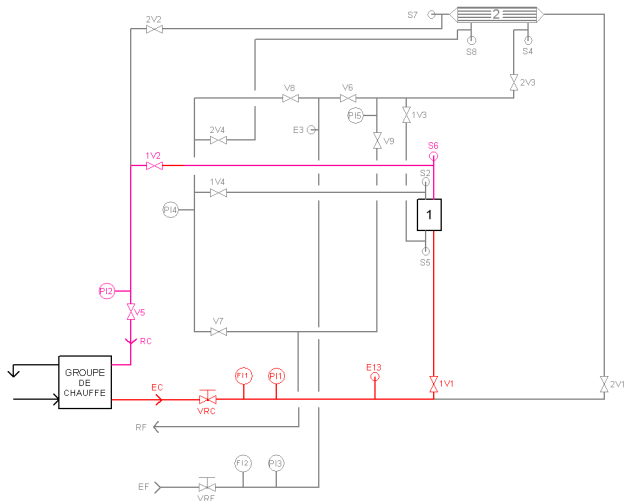


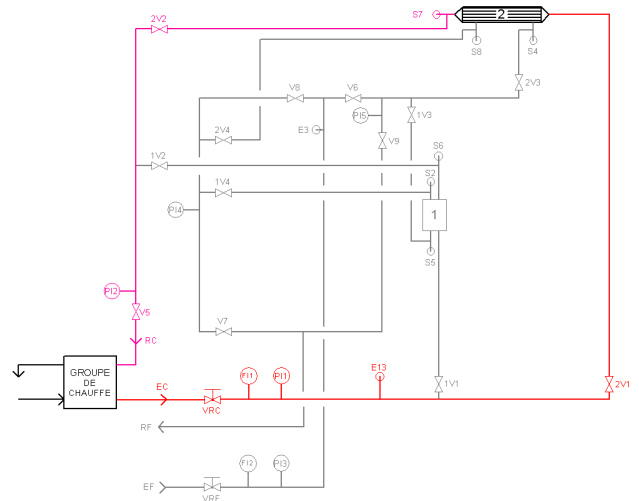
FIGURE 2 – Banc expérimental de la machine frigorifique

2.1 Nomenclature

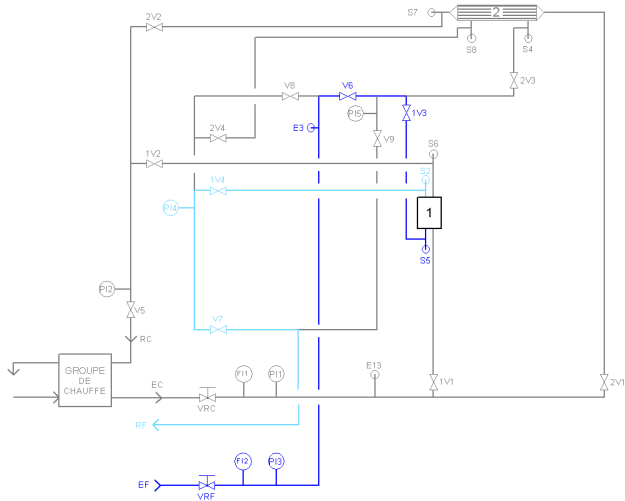
- VRC Vanne de réglage du débit de fluide thermique
- VRF Vanne de réglage du débit d'eau froide
- 1V1 Vanne de mise en ligne de l'échangeur à plaques de l'entrée fluide chaud
- 1V2 Vanne de mise en ligne de l'échangeur à plaques de la sortie fluide chaud
- 1V3 Vanne de mise en ligne de l'échangeur à plaques de l'entrée fluide froid à co-courant ou de la sortie fluide froid à contre-courant
- 1V4 Vanne de mise en ligne de l'échangeur à plaques de la sortie fluide froid à co-courant ou de l'entrée fluide froid à contre-courant (absente sur le système)
- 2V1 Vanne de mise en ligne de l'échangeur multitubulaire de l'entrée fluide chaud
- 2V2 Vanne de mise en ligne de l'échangeur multitubulaire de la sortie fluide chaud
- 2V3 Vanne de mise en ligne de l'échangeur multitubulaire de l'entrée fluide froid à co-courant ou de la sortie fluide froid à contre-courant
- 2V4 Vanne de mise en ligne de l'échangeur multitubulaire de la sortie fluide froid à co-courant ou de l'entrée fluide froid à contre-courant
- V5 Vanne de mise en ligne du circuit chaud en sortie des échangeurs
- V6 Vanne de mise en ligne du circuit froid à co-courant en entrée des échangeurs
- V7 Vanne de mise en ligne du circuit froid à co-courant en sortie des échangeurs
- V8 Vanne de mise en ligne du circuit froid à contre-courant en entrée des échangeurs
- V9 Vanne de mise en ligne du circuit froid à contre-courant en sortie des échangeurs
- FI1 Débitmètre à flotteur (200-2000 ℓ/h) : débit de fluide chaud (eau à 90 °C)
- FI2 Débitmètre à flotteur (200-2000 ℓ/h) : débit de fluide froid (eau à 20 °C)
- PI1 Manomètre de Bourdon (0-2,5 bars) : pression en entrée du fluide chaud
- PI2 Manomètre de Bourdon (0-2,5 bars) : pression en sortie du fluide chaud
- PI3 Manomètre de Bourdon (0-2,5 bars) : pression en entrée du fluide froid
- PI4 Manomètre de Bourdon (0-2,5 bars) : pression en sortie du fluide froid à co-courant
- PI5 Manomètre de Bourdon (0-2,5 bars) : pression en sortie du fluide froid à contre-courant
- S1-S8 8 sondes de mesure de température de type Pt100, 3 fils, diamètre 6 mm, longueur 100 mm en acier inoxydable 304L, échelle -50/+400 °C
- Groupe de chauffe / froid : alimentation en fluide thermique (Fig 4)



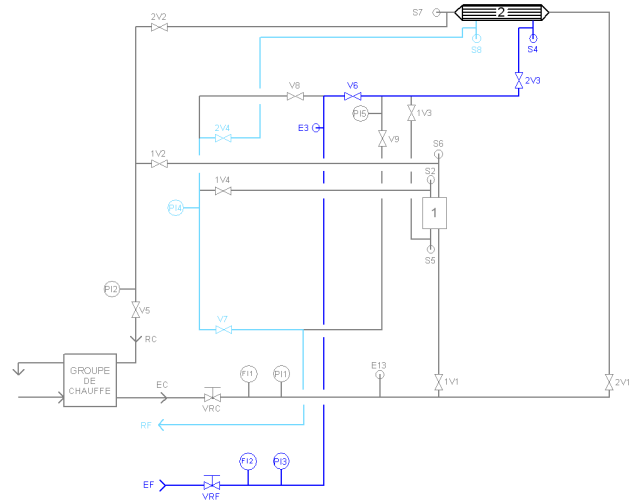
(a) Circuit chaud - plaques



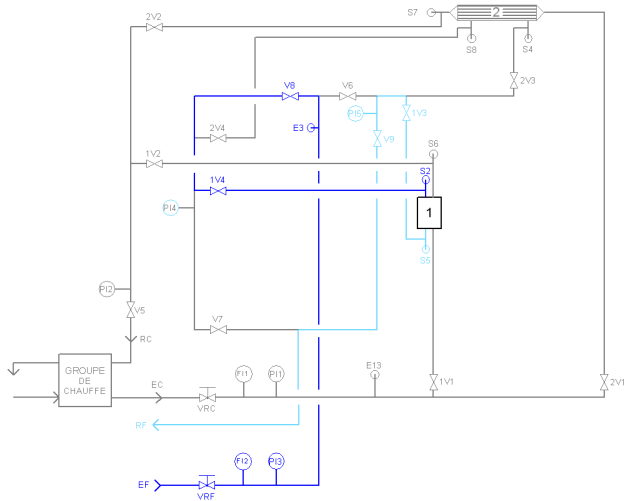
(b) Circuit chaud - tubulaire



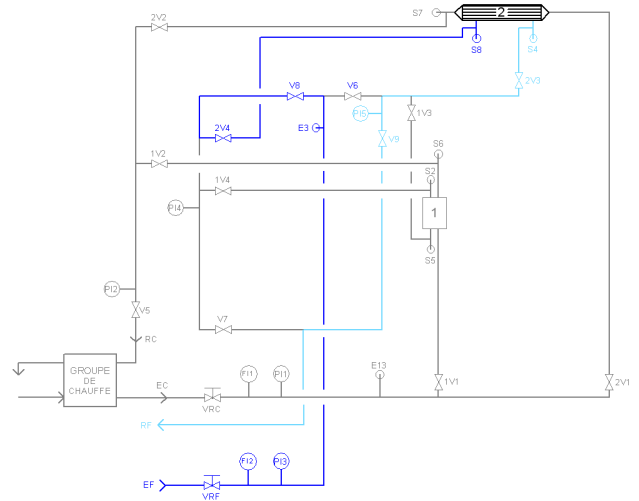
(c) Circuit froid co-courant - plaques



(d) Circuit froid co-courant - tubulaire



(e) Circuit froid contre-courant - plaques



(f) Circuit froid contre-courant - tubulaire

FIGURE 3 – Représentation schématique des différents réseaux dans l'échangeur.

2.2 Echangeurs

1. Échangeur à plaques : en acier inoxydable 304L, plaques inox brasées, joints d'étanchéité EPDM. Circulation à une seule passe côté fluide thermique et côté fluide de refroidissement. 9 plaques de surface unitaire $0,0125 \text{ m}^2$. Surface totale d'échange $0,113 \text{ m}^2$.
2. Échangeur multitubulaire (cf. Fig. 2) : virole en acier inoxydable 304L, faisceau multitubulaire composé de 9 tubes en acier inoxydable 304L (diamètre extérieur 12 mm, longueur de 0,34 m), 1 passe, 2 chicanes en acier inoxydable 304L. Surface totale d'échange $0,115 \text{ m}^2$. L'ensemble des dimensions de l'échangeur tubulaires sont détaillés sur la Fig. 5.

3 Description du dispositif expérimental

3.1 Recommandations

Avant de procéder aux essais, il convient de :

- Purger l'air de tous les circuits.
- Afin d'éviter tous risques de brûlures, il est recommandé de purger les circuits en activant seulement la pompe du groupe de chauffe.
- Veillez à ne pas dépasser une consigne de température de $80 \text{ }^\circ\text{C}$ au niveau du groupe de chauffe.
- La pression dans le circuit d'eau chaude et dans le circuit d'eau froide ne doit pas excéder 2 bars.
- Le circuit froid circule dans la calandre extérieure et le fluide chaud circule dans les multitubes. Les étanchéités peuvent être à refaire tous les ans au niveau des joints PTFE des vannes ou des raccords filetés.

!!! ATTENTION : L'équipement est prévu pour accepter des températures de chauffe inférieures à $80 \text{ }^\circ\text{C}$, ce qui peut présenter des risques de brûlures pour l'utilisateur. Il est donc recommandé de bien identifier les circuits chaud / froid avant tout essai.

Remarque : En fin de manipulation, laisser l'installation vide afin de pouvoir mesurer les offsets des sondes à l'air en début de manipulation suivante.

3.2 Mise en route

Lors de la première mise en route, il convient de remplir tous les circuits.

3.2.1 Circuit d'eau froide

Les circuits seront remplis et purgés l'un après l'autre. Fermer toutes vannes et ouvrir V6 et V7. Ouvrir la vanne d'arrivée d'eau générale de la salle reliée au circuit d'eau froide.

- Pour remplir l'échangeur multitubulaire, ouvrir 2V3 et 2V4. Ouvrir la vanne de réglage du débit VRF et laisser se remplir l'échangeur. Si le remplissage se fait difficilement, fermer légèrement 2V4 et ouvrir une ou deux vannes de purge sur le dessus de la calandre. Lorsque la calandre est remplie, rouvrir 2V4.
- Pour remplir l'échangeur à plaques, ouvrir 1V3 et 1V4 (absente) puis fermer 2V3 et 2V4 (échangeur multitubulaire). Laisser se remplir l'échangeur en fermant légèrement 1V4 si nécessaire.
- Fermer alors la vanne VRF puis les vannes 1V3 et 1V4 (absente).

Le circuit froid est prêt à être utilisé.

Remarque : il se peut qu'au cours de la manipulation il soit nécessaire de re-purger un peu l'air dans l'un des échangeurs. Dans ce cas, répéter l'opération sur l'échangeur sélectionné.

3.2.2 Circuit d'eau chaude

- Ouvrir la vanne d'arrivée d'eau générale de la salle reliée au groupe de chauffe ainsi que la vanne de barrage située à l'arrière du groupe de chauffe ("ALIMENTATION").
- Fermer toutes vannes sur le circuit chaud. Ouvrir V5.
- Mettre l'armoire électrique sous tension en commutant le sectionneur général sur "I". Réarmer en appuyant sur le bouton vert "EN SERVICE".
- Mettre le groupe de chauffe sous tension en commutant son sectionneur général sur "2" (fonctionnement en pression).

!!! ATTENTION : Ne pas démarrer le groupe de chauffe tant qu'un circuit n'a pas été créé. L'eau doit pouvoir circuler librement entre le refoulement et le retour du groupe de chauffe.

- Pour remplir l'échangeur multitubulaire, ouvrir 2V1 et 2V2. Ouvrir la vanne de réglage du débit VRC.
- Pour démarrer le groupe de chauffe, appuyer sur le bouton noir « Start pump ». Le régulateur clignote pendant 5 secondes et affiche :
 - la température lue en °C,
 - la consigne de température en °C.
- Le groupe va s'amorcer. Si la pompe s'arrête, au besoin, recommencer l'opération.
- Sur le régulateur, programmer une température de consigne inférieure à la température ambiante (ex : 10 °C) afin d'obliger le groupe à laisser entrer de l'eau froide en permanence comme pour refroidir. (Voir procédure du groupe de chauffe en section 3.2)
- Laisser se purger le groupe lui-même ainsi que le circuit. Si le remplissage se fait difficilement, fermer légèrement 2V2. Laisser le circuit se purger.

- Lorsqu'il n'y a plus de bulles d'air dans ce circuit, remplir l'échangeur à plaques. Pour ce faire, ouvrir les vannes 1V1 et 1V2 puis fermer les vannes 2V1 et 2V2. Si le remplissage se fait difficilement, fermer légèrement 1V2. Laisser le circuit se purger.
- Lorsque tous les circuits sont pleins, arrêter le groupe de chauffe.

Le circuit chaud est prêt à être utilisé.

Remarque : en cours de chauffe, le groupe de chauffe ne réintroduira pas d'eau tant que la température de consigne ne sera pas atteinte. Cette phase de purge avec une consigne basse est donc très importante.

3.3 Utilisation

Ouvrir les arrivées d'eau connectées au groupe de chauffe et à l'arrivée d'eau froide sur le pilote. Mettre sous tension le coffret électrique puis appuyer sur le bouton vert de réarmement général "EN SERVICE". L'écran se met sous tension. Mettre sous tension le groupe de chauffe en commutant son sectionneur général sur "2".

Remarque : chaque description de circuit est donnée en partant toutes vannes fermées initialement sur l'appareil. Vérifier la pression sur les manomètres : fermer les arrivées d'eau si la pression monte afin de ne pas détériorer le matériel. Ils vous signalent si les circuits sont ouverts ou non.

3.3.1 Étude de l'échangeur à plaques

Pour le **circuit chaud** :

- Ouvrir 1V1 et 1V2. Ouvrir VRC et V5.
- Mettre en route le groupe de chauffe et régler la température de consigne à la valeur souhaitée.

Pour le **circuit froid** : Sur le coffret électrique positionner le commutateur "ECHANGEURS" sur la position "1 – A PLAQUES". Sélectionner le sens de circulation en commutant le bouton "SENS DE CIRCULATION" sur la position souhaitée : "1 – CO-COURANT" ou "2 – CONTRE-COURANT".

- En co-courant :
 - Ouvrir les vannes V6, 1V3, 1V4 (absente) et V7. Ouvrir la vanne VRF et régler le débit d'eau froide souhaité dans l'échangeur.
 - Les températures s'affichant sont les suivantes :

Afficheur	Sonde	Afficheur	Sonde
Entrée fluide chaud	E13	Entrée fluide froid	E3
Sortie fluide chaud	S6	Sortie fluide froid	S2

— En contre-courant :

— Ouvrir les vannes V8, 1V4 (absente), 1V3 et V9. Ouvrir la vanne VRF et régler le débit d'eau froide souhaité dans l'échangeur.

— Les températures s'affichant sont les suivantes :

Afficheur	Sonde	Afficheur	Sonde
Entrée fluide chaud	E13	Entrée fluide froid	E3
Sortie fluide chaud	S6	Sortie fluide froid	S5

3.3.2 Étude de l'échangeur multitubulaire

Pour le **circuit chaud** :

— Ouvrir 2V1 et 2V2. Ouvrir VRC et V5.

— Mettre en route le groupe de chauffe et régler la température de consigne à la valeur souhaitée.

Pour le **circuit froid** : Sur le coffret électrique, positionner le commutateur "ECHANGEURS" sur la position "2 – MULTITUBULAIRE". Sélectionner le sens de circulation en commutant le bouton "SENS DE CIRCULATION" sur la position souhaitée : "1 – CO-COURANT" ou "2 – CONTRE-COURANT".

— En co-courant :

— o Ouvrir les vannes V6, 2V3, 2V4 et V7. Ouvrir la vanne VRF et régler le débit d'eau froide souhaité dans l'échangeur.

— Les températures s'affichant sont les suivantes :

Afficheur	Sonde	Afficheur	Sonde
Entrée fluide chaud	E13	Entrée fluide froid	E3
Sortie fluide chaud	S7	Sortie fluide froid	S8

— En contre-courant :

— o Ouvrir les vannes V8, 2V4, 2V3 et V9. Ouvrir la vanne VRF et régler le débit d'eau froide souhaité dans l'échangeur.

— Les températures s'affichant sont les suivantes :

Afficheur	Sonde	Afficheur	Sonde
Entrée fluide chaud	E13	Entrée fluide froid	E3
Sortie fluide chaud	S7	Sortie fluide froid	S4

Pour chacun des circuits à étudier, régler les valeurs de consigne du groupe ainsi que les débits. Laisser s'équilibrer les échanges. Lorsque les températures sont stables, relever les mesures.

Remarque : lors du démarrage, laisser le groupe de chauffe se mettre en température avant d'ouvrir VRF.

!!! ATTENTION : ne pas faire tourner le groupe lorsque le circuit de circulation n'est pas fait.

3.3.3 Arrêt

- En fin de séance, régler une consigne basse sur le groupe de chauffe afin de faire refroidir les canalisations utilisées.
- Laisser la circulation d'eau froide dans les deux circuits pendant quelques minutes.
- Lorsque la température est redescendue, arrêter le groupe de chauffe. Pour cela, commuter le sectionneur général sur la position "0".
- Fermer les vannes d'arrivées d'eau sur le groupe et sur le circuit d'eau froide.
- Appuyer sur le bouton rouge "HORS SERVICE".
- Commuter le sectionneur général de l'armoire électrique sur "0".

Si vous ne souhaitez pas vidanger le pilote pour éviter de re-purger entièrement les circuits, fermez toutes les vannes de l'installation afin d'éviter l'écoulement.

3.4 Réglage du groupe de chauffe

Le groupe se met sous tension en commutant le sectionneur général (face avant du groupe) sur "1" (dépression) ou sur "2" (Pression). Sur ce banc, on travaillera en pression sur la position 2 (Fig. 4). Mettre le groupe en service (voir section 3.2). Sélectionner la consigne de température souhaitée sur le régulateur intégré au groupe de chauffe. Cette température est fixée à la Température de pasteurisation (65 °C) + 2 °C .

!!! ATTENTION : Le groupe doit impérativement être alimenté en eau durant son fonctionnement. En effet, la régulation de la température d'eau se fait par apport d'eau du réseau lorsque la température mesurée est supérieure à la consigne.

!!! ATTENTION : Pour des raisons de sécurité et de risques de brûlures, il est recommandé aux utilisateurs de faire attention de ne pas toucher les tuyauteries du circuit chaud en fonctionnement.

!!! ATTENTION : Le fluide chaud circulant dans les calandres extérieures, il est recommandé aux utilisateurs de ne pas toucher les échangeurs en fonctionnement.

!!! ATTENTION : Pour des raisons de matériel, il est recommandé de ne pas chauffer à plus de 80 °C .

4 Dossier théorique : Transfert de la chaleur entre deux fluides séparés par une paroi en régime permanent

Il existe deux méthodes de calcul pour le dimensionnement des échangeurs de chaleur :

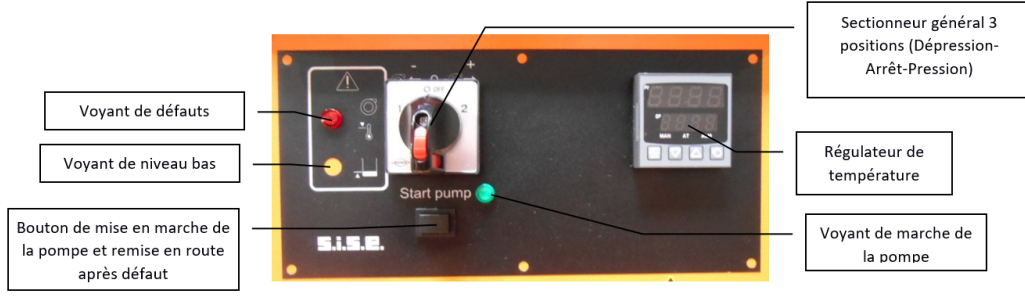


FIGURE 4 – Groupe de chauffe

- La méthode de la Différence de Température Logarithmique Moyenne : elle est utilisée lorsque les températures des fluides d'entrée et de sortie sont connues.
- La méthode du Nombre d'Unités de Transferts : elle est utilisée quand seules les températures d'entrées sont connues. Elle fait intervenir les notions d'efficacité de l'échange et le NUT.

4.1 Bilan thermique

Considérons un système parfaitement calorifugé (sans pertes extérieures) constitué par la surface d'échange A de part et d'autre de laquelle circulent deux fluides, l'un chaud, l'autre froid :

- le fluide chaud entre dans l'appareil à la température T_1
- le fluide chaud sort de l'appareil à la température T_2
- le fluide froid entre dans l'appareil à la température T_3
- le fluide froid sort de l'appareil à la température T_4

Le débit massique du fluide chaud (en kg/h) est

$$\dot{m} = \rho u S \quad (1)$$

Le débit massique du fluide froid (en kg/h) est

$$\dot{m}' = \rho' u' S' \quad (2)$$

avec

- ρ et ρ' : masses volumiques des fluides chaud et froid, respectivement (kg/m^3),
- u et u' : vitesses moyennes des fluides chaud et froid, respectivement (m/h),
- S et S' : les sections droites de l'écoulement du fluide chaud et froid (m^2)

Puisqu'il n'y a pas de pertes de chaleur, la chaleur totale Q perdue par le fluide chaud, est intégralement gagnée par le fluide froid, et on peut écrire :

$$Q = \dot{m} C_p (T_1 - T_2) = \dot{m}' C'_p (T_3 - T_4) \quad (3)$$

avec C_p et C'_p les chaleurs spécifiques moyennes des fluides chaud et froid. (kcal/kg/K). Pour l'eau, on a $C_p = 1 \text{ kcal/kg/K} = 4190 \text{ J/kg/K}$

4.2 Coefficient d'échange global

Si l'on désigne par H le coefficient de transfert global de la surface d'échange, une autre relation peut être obtenue en utilisant la différence de température ΔT entre les fluides chaud et froid. Cependant, comme les températures varient en fonction de la position le long de l'échangeur, il faudra utiliser la loi de Newton sous la forme :

$$Q = HA\Delta T_m \quad (4)$$

avec

- A la surface d'échange (m^2)
- H le coefficient d'échange global ($(\text{kcal/h})/\text{m}^2/^\circ\text{C}$),
- ΔT_m la moyenne de la différence de température pour l'ensemble de l'échangeur ($^\circ\text{C}$).

Lorsque l'expression de ΔT_m est connue, les équations précédentes permettent d'analyser les performances thermiques de l'appareil et son dimensionnement.

En effet, le coefficient global d'échange H peut être défini en utilisant des relations simples, établies à partir des coefficients de transferts convectifs associés au fluide chaud et au fluide froid, et de la conduction de la paroi.

4.2.1 Paroi plane

Si les fluides sont séparés par une paroi plane, on calcule H par la relation :

$$\frac{1}{H} = \frac{1}{h_i} + \frac{1}{h_e} + \frac{e}{\lambda} \quad (5)$$

avec

- h_i le coefficient de transfert du fluide chaud ($\text{kcal/h/m}^2/^\circ\text{C}$),
- h_e le coefficient de transfert du fluide froid ($\text{kcal/h/m}^2/^\circ\text{C}$),
- e l'épaisseur de la paroi (m),
- λ la conductibilité thermique de la paroi ($\text{kcal/h/m/}^\circ\text{C}$).

4.2.2 Tube cylindrique

On utilise l'une ou l'autre des relations suivantes, selon que l'on prend comme référence la surface interne ou la surface externe du tube :

$$\frac{1}{H_i} = \frac{1}{h_i} + \frac{D_i}{2\lambda} \ln \left(\frac{D_i}{D_e} \right) + \frac{D_i}{D_e} \frac{1}{h_e} \quad (6)$$

avec $H_e D_e = H_i D_i$ et D_i et D_e les diamètres intérieur et extérieur du tube (m).

Résistance d'encrassement Ces relations ne s'appliquent qu'à des surfaces propres. En service normal, la surface des tubes d'échangeurs est fréquemment sujette à l'encrassement provoqué par les impuretés du fluide, la formation de rouille ou des réactions entre le fluide et le matériau qui constitue la paroi. Ces dépôts augmentent considérablement la résistance thermique. On en tient compte en introduisant un terme dit "facteur d'encrassement" ou mieux "résistance d'encrassement" : R qu'on applique aux surfaces internes R_i et externes R_e du tube. Dans ce cas, le "coefficient de transfert global en service" est évalué par :

$$\frac{1}{H_i} = \frac{1}{h_i} + R_i + \frac{D_i}{2\lambda} \ln \left(\frac{D_e}{D_i} \right) + \frac{D_i}{D_e} R_e + \frac{D_i}{D_e} \frac{1}{h_e} \quad (7)$$

ou

$$\frac{1}{H_e} = \frac{1}{h_e} + R_e + \frac{D_e}{2\lambda} \ln \left(\frac{D_e}{D_i} \right) + \frac{D_e}{D_i} R_i + \frac{D_e}{D_i} \frac{1}{h_i} \quad (8)$$

4.3 Différence moyenne de température

Pour un échangeur à tubes coaxiaux, l'expression de ΔT_m peut être obtenue par un bilan d'énergie sur des petits éléments de longueur dx . En supposant que le coefficient de transfert global soit constant dans l'échangeur, on obtient :

$$\Delta T_m = \frac{\Delta T_s - \Delta T_e}{\ln \left(\frac{\Delta T_s}{\Delta T_e} \right)} \quad (9)$$

ΔT_m est appelée différence de température moyenne logarithmique, $\Delta T_s > 0$ la différence de température en sortie de l'échangeur et $\Delta T_e > 0$ la différence de température en entrée de l'échangeur.

Le flux de chaleur est donc :

$$Q = HA\Delta T_m \quad (10)$$

Pour les échangeurs multitubulaires, du fait de la complexité de l'écoulement, il faut tenir compte d'un facteur correctif F tel que :

$$Q = F \times HA\Delta T_m \quad (11)$$

Les valeurs de F sont classiquement tabulées sous forme de graphes pour chaque type d'échangeur (mono-passe et multi-passes).

4.4 Coefficient d'échange local

Les propriétés de l'eau sont données dans le tableau 1.

4.4.1 Échangeur à serpentín

$$h_i = \frac{900 \times (1,352 + 0,02 \times T)u^{0,8}}{D_i^{0,2}} \quad (12)$$

avec T la moyenne arithmétique des températures du fluide chaud entre l'entrée et la sortie du serpentín ($^{\circ}\text{C}$).

$$h_e = \frac{0,22}{D_e} \left(\frac{D_e u'}{\nu'} \right)^{0,6} (C_p \mu')^{0,3} \left(\frac{\mu'}{\mu_t} \right)^{0,14} \quad (13)$$

avec

- μ' la viscosité dynamique du fluide de refroidissement à la température moyenne arithmétique entre l'entrée et la sortie de la virole (kg/m/s)
- ν' la viscosité cinématique du fluide de refroidissement à la température moyenne arithmétique entre l'entrée et la sortie de la virole (m^2/s)
- μ_t la viscosité dynamique du fluide chaud à la température moyenne arithmétique entre l'entrée et la sortie du serpentín (kg/m/s)
- $u' = Q'_v/S$
- Q'_v le débit du fluide de refroidissement (m^3/s),
- S la section droite libre de la virole (m^2).

4.4.2 Échangeur tubulaire

$$h_i = \frac{900 \times (1,352 + 0,02 \times T)u^{0,8}}{D_i^{0,2}} \quad (14)$$

avec

- T la moyenne arithmétique des températures du fluide chaud entre l'entrée et la sortie du serpentín ($^{\circ}\text{C}$).
- u la vitesse du fluide chaud dans les tubes (m/s)

$$u = \frac{4Q_v}{\pi D_i^2 \frac{N_t}{N_p}} \quad (15)$$

- N_t le nombre de tubes
- N_p le nombre de passes du fluide chaud (1 dans notre cas)
- Q_v le débit du fluide de refroidissement (m^3/s),

et

$$h_e = \frac{0,22}{D_e} \left(\frac{D_e G_c}{\nu'} \right)^{0,6} (C_p \mu')^{0,3} \left(\frac{\mu'}{\mu_t} \right)^{0,14} \quad (16)$$

avec

- μ' la viscosité dynamique du fluide de refroidissement à la température moyenne arithmétique entre l'entrée et la sortie de la virole (kg/m/s)
- ν' la viscosité cinématique du fluide de refroidissement à la température moyenne arithmétique entre l'entrée et la sortie de la virole (m²/s)
- μ_t la viscosité dynamique du fluide chaud à la température moyenne arithmétique entre l'entrée et la sortie du serpent in (kg/m/s)
- $u = Q_v/S$
- S la section droite libre de la virole (ou calandre) dans laquelle le fluide froid circule (m²),
- G_c la vitesse massique moyenne (kg/s/m²)

$$G_c = \sqrt{G_{ct}^2 - G_{cl}^2} \quad (17)$$

- G_{ct} la vitesse massique transversale (kg/s/m²)

$$G_{ct} = \frac{4\dot{m}}{\pi(D_n^2 - N_t D_e^2)x} \quad (18)$$

- G_{cl} la vitesse massique longitudinale (kg/s/m²)

$$G_{cl} = \frac{\dot{m}P}{BD_n(P - D_e)} \quad (19)$$

- x le rapport de l'aire de passage libre laissée par les chicanes à la section intérieure de la calandre (on supposera $x = 0,5$)

$$x = \frac{S_c - S}{S} \quad (20)$$

- S_c l'aire d'une chicane (m²)
- P la triangulation des tubes (m)
- D_n le diamètre nominal de la virole ou calandre dans laquelle le fluide froid circule (m)
- B distance entre deux chicanes (m)

5 Travail à mener

- Avant de faire des bilans thermiques, il est impératif de corriger les températures données par les sondes en leur appliquant un offset. Afin de mesurer l'offset des sondes, avant toute manipulation, faire circuler de l'eau froide dans toute l'installation, laisser les températures s'équilibrer et relever les valeurs des sondes (toutes ou juste celles nécessaires pour la manipulation). Faire une moyenne de ces valeurs. À partir de cette moyenne, calculer l'offset de chaque sonde.

- Mettre en route l'installation (cf. section 3.2)
- Ouvrir les vannes correspondant au circuit souhaité.
- Mettre en route le groupe de chauffe. Idem pour l'alimentation en eau froide.

5.1 Échangeur multitubulaire

5.1.1 Montage contre-courant

1. Pour une température maximale de consigne à 50 °C, un débit de fluide froid fixe et supérieur à celui chaud, relever les températures des circuits froid et chaud pour plusieurs débits de fluide chaud. Pour chaque débit,
 - calculer le flux de chaleur total échangé dans l'échangeur multitubulaire,
 - calculer ΔT_m , la différence de température moyenne logarithmique,
 - en déduire HAF , le produit du coefficient d'échange global H par la surface d'échange A et le facteur correctif F dû à la forme de l'échangeur,
 - en déduire $H_{eff} = HF$ le coefficient d'échange global effectif. Dans la suite, la valeur de H sera assimilée à H_{eff} .
 - En déduire l'efficacité de l'échangeur qui est le rapport de la puissance thermique réellement échangée à la puissance d'échange maximum théoriquement possible, avec les mêmes conditions d'entrées des fluides (nature, débit, ...) dans l'échangeur :

$$\varepsilon = \frac{Q_{reel}}{Q_{max}} \quad (21)$$

où Q_{max} est la puissance engendrée si l'un des deux fluides subit un changement de température égal à l'écart maximum existant dans l'échangeur. Comparer cette valeur à l'expression théorique débit calorifique du fluide froid $C' = \dot{m}'C'_p$ supérieur à celui du fluide chaud $C = \dot{m}_c C_p$

$$\varepsilon = \frac{T_{ce} - T_{cs}}{T_{ce} - T_{fe}} = \frac{1 - \exp\left(-\left(\frac{1}{C'} - \frac{1}{C}\right)HA\right)}{1 + \frac{C}{C'}} \quad (22)$$

avec

- T_{ce} la température chaude en entrée
- T_{fe} la température froide en entrée
- T_{cs} la température chaude en sortie
- En déduire le Nombre d'Unités de Transfert (NUT) qui caractérise le pouvoir d'échange de l'échangeur.

$$NUT = \frac{AH}{\min(C, C')} \quad (23)$$

et le comparer à l'expression théorique

$$NUT_{\max} = \frac{1}{Z-1} \ln \left(\frac{\varepsilon - 1}{Z\varepsilon - 1} \right) \quad (24)$$

avec $Z = \min((C', C)) / \max(C', C)$.

2. Refaire les mêmes mesures pour une autre valeur inférieure de la température de consigne chaude.

5.1.2 Montage co-courant

Procéder aux mêmes mesures que précédemment pour les mêmes paramètres de température, de consigne et de débits. Avec les mêmes conditions que pour l'échangeur contre-courant, la valeur théorique de l'efficacité s'écrit :

$$\varepsilon = \frac{T_{ce} - T_{cs}}{T_{ce} - T_{fe}} = \frac{1 - \exp \left(- \left(\frac{1}{C'} - \frac{1}{C} \right) HA \right)}{1 - \frac{C}{C'} \exp \left(- \left(\frac{1}{C'} - \frac{1}{C} \right) HA \right)} \quad (25)$$

et

$$NUT_{\max} = - \frac{\ln(1 - (1 + Z)\varepsilon)}{1 + Z} \quad (26)$$

5.2 Échangeur à plaques

Réaliser les mêmes relevés que pour l'échangeur multitubulaire dans le cas co-courant et contre-courant avec une température maximale de consigne à 30 °C, et une autre inférieure. Comparer avec les valeurs des efficacités théoriques.

5.3 Commentaires et analyses libres

Tracer les courbes montrant la variation de l'efficacité et du NUT en fonction des paramètres.

Physical properties of water (SI units)

Temperature T (°C)	Specific Weight γ (kN/m ³)	Density ^a ρ (kg/m ³)	Dynamic Viscosity ^b μ ($\times 10^{-3}$ kg/m·s)	Kinematic Viscosity ν ($\times 10^{-6}$ m ² /s)	Surface Tension ^c σ (N/m)	Modulus of Elasticity ^a E ($\times 10^9$ N/m ²)	Vapor Pressure P _v (kN/m ²)
0	9.805	999.8	1.781	1.785	0.0765	1.98	0.61
5	9.807	1000.0	1.518	1.519	0.0749	2.05	0.87
10	9.804	999.7	1.307	1.306	0.0742	2.10	1.23
15	9.798	999.1	1.139	1.139	0.0735	2.15	1.70
20	9.789	998.2	1.002	1.003	0.0728	2.17	2.34
25	9.777	997.0	0.890	0.893	0.0720	2.22	3.17
30	9.764	995.7	0.798	0.800	0.0712	2.25	4.24
40	9.730	992.2	0.653	0.658	0.0696	2.28	7.38
50	9.689	988.0	0.547	0.553	0.0679	2.29	12.33
60	9.642	983.2	0.466	0.474	0.0662	2.28	19.92
70	9.589	977.8	0.404	0.413	0.0644	2.25	31.16
80	9.530	971.8	0.354	0.364	0.0626	2.20	47.34
90	9.466	965.3	0.315	0.326	0.0608	2.14	70.10
100	9.399	958.4	0.282	0.294	0.0589	2.07	101.33

Source: Adapted from J. K. Venard and R. L. Street (1975). *Elementary Fluid Mechanics*, 5th ed., Wiley, New York.

^aAt atmospheric pressure.

^bDynamic viscosity can also be expressed in units of N·s/m².

^cIn contact with air.

TABLEAU 1 – Propriétés de l'eau en fonction de la température

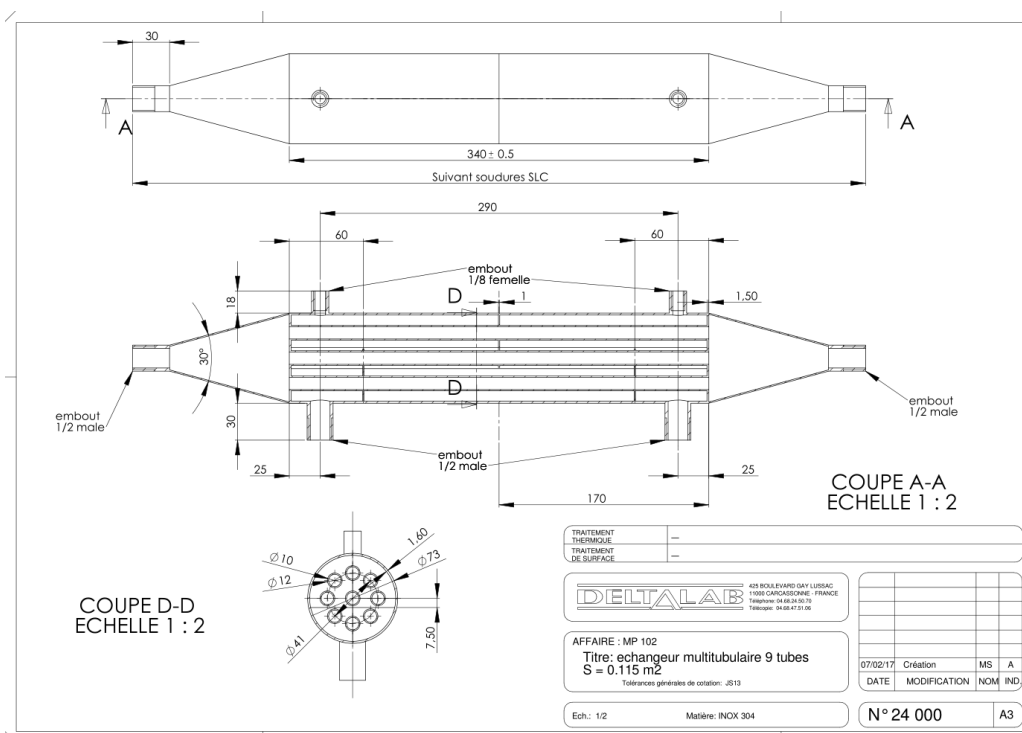


FIGURE 5 – Échangeur multitubulaire, 1 passe (9 tubes) et 2 chicanes

Table III. Measured Properties of 304L SS

T (K)	λ (W · m ⁻¹ · K ⁻¹)	ρ (μΩ · cm) ^a	S (μV · K ⁻¹) ^b	α (cm ² · s ⁻¹)
ORNL ^c				
333.7	14.92	74.83	-1.40	
354.9	15.27	76.46	-1.51	
380.1	15.62	78.39	-1.78	
380.3	15.77	78.62	-1.66	
402.4	16.16	80.10	-1.90	
423.1	16.63	81.69	-2.10	
450.4	17.04	83.79	-2.31	
450.5	17.06	83.84	-2.19	
474.8	17.42	85.50	-2.41	
476.1	17.58	85.77	-2.49	
573.1	18.99	92.17	-3.03	
673.2	20.46	98.17	-3.40	
975.3	24.33	112.29	-3.66	
Springfields				
297.2	14.25 ^d			0.0375
300.2	14.04			0.0370
303.2	14.53			0.0382
305.2	14.33			0.0377
308.2	14.40			0.0378
313.2	14.54			0.0381
339.2	15.07			0.0391
347.2	15.10			0.0391
355.2	15.08			0.0390
366.2	15.39			0.0395
373.2	15.61			0.0400
398.2	16.00			0.0406
423.2	16.53			0.0416

^a Corrected for thermal expansion.

^b Absolute Seebeck coefficient.

^c $\lambda = 7.9318 + 0.023051 T - 6.4166 \times 10^{-6} T^2$ (λ in W · m⁻¹ · K⁻¹). $\rho = 43.869 + 0.10443 T - 3.5154 \times 10^{-5} T^2$ (ρ in μΩ · cm). $S = 2.527 - 0.01434 T + 8.202 \times 10^{-6} T^2$ (S in μV · K⁻¹). $C_p = 0.4267 + 1.700 \times 10^{-4} T + 5.200 \times 10^{-8} T^2$ (C_p in J · g⁻¹ · K⁻¹). $\alpha = 3.0246 \times 10^{-2} + 1.9016 \times 10^{-5} T + 1.7244 \times 10^{-8} T^2$ (α in cm² · s⁻¹).

^d Values calculated from α measurements.

TABLEAU 2 – Propriétés de l'acier inoxydable 304L