

TRANSFERTS THERMIQUES EN ECHANGEUR

Enseignante référente : Nakry PEN (Nakry.Pen@univ-lorraine.fr)

Consignes de sécurité propres à ce TP :

- L'utilisation de vapeur impose le port des lunettes de protection pendant toute la durée du TP, même pour les étudiants ne réalisant pas les manipulations.
- Lors de leur fonctionnement, les échangeurs doivent être manipulés avec le gant de protection thermique car les parois chaudes peuvent causer des brûlures.

Pré-requis :

- Module de Transferts de matière et de chaleur, cours "Convection thermique", Éric OLMOS, ENSAIA, 1^{re} année IA.
- Module de Introduction aux méthodes de génie des procédés, cours "Bilans thermiques", Frantz FOURNIER, ENSAIA, 1^{re} année IA.
- Module de Thermodynamique pour la sobriété énergétique, cours "Bases I", Jérémy PETIT, ENSAIA, 1^{re} année IA.

1. INTRODUCTION ET OBJECTIFS

Les échangeurs de chaleur sont des opérations unitaires largement utilisées dans l'industrie agro-alimentaire pour, entre autres, les procédés de pasteurisation, stérilisation, maintien en température, congélation. Leur fonctionnement est basé sur l'échange de chaleur entre l'aliment et un fluide caloporteur (eau chaude, vapeur, fluide frigorigène). Dans la plupart des applications, le contact entre les deux fluides est indirect et le transfert de chaleur s'effectue au travers d'une paroi métallique (acier inoxydable). Pour des questions environnementales (réduction de la quantité d'énergie dépensée), économiques et techniques (réduction de l'encombrement des installations), on dimensionnera *au plus juste* ces opérations unitaires. Sans aller jusqu'à l'optimisation du procédé, le calcul du coefficient d'échange thermique, de l'aire d'échange nécessaire et le bilan thermique global sont des préalables indispensables à la conception et à la mise en œuvre des échangeurs de chaleur.

L'étude de l'installation pilote disponible lors de cette séance (et complétée par une étude plus poussée en deuxième année) propose une méthodologie pour la détermination expérimentale des grandeurs critiques (métrologie mise en œuvre, modèles de transfert thermique, exploitation des résultats).

Des schémas et une description des principaux échangeurs de chaleur rencontrés actuellement dans l'industrie sont disponibles en fin de l'énoncé.

Les objectifs de ce TP sont :

- De calculer le flux thermique échangé q et le coefficient global de transfert thermique h_g .
- D'évaluer les performances de transfert thermique de différents échangeurs thermiques (bitube, multitube, plaques).

Il sera demandé d'étudier l'influence des paramètres de procédé suivants :

- Débits des fluides.
- Configuration (co-courant ; contre-courant).
- Géométrie de l'échangeur.

2. CONCEPTS THEORIQUES

A. CALCULS THEORIQUES

a. MODELISATION

Le transfert thermique par convection peut être modélisé par une relation simple qui permet d'évaluer le flux échangé q (W) selon la relation (Figure 1) :

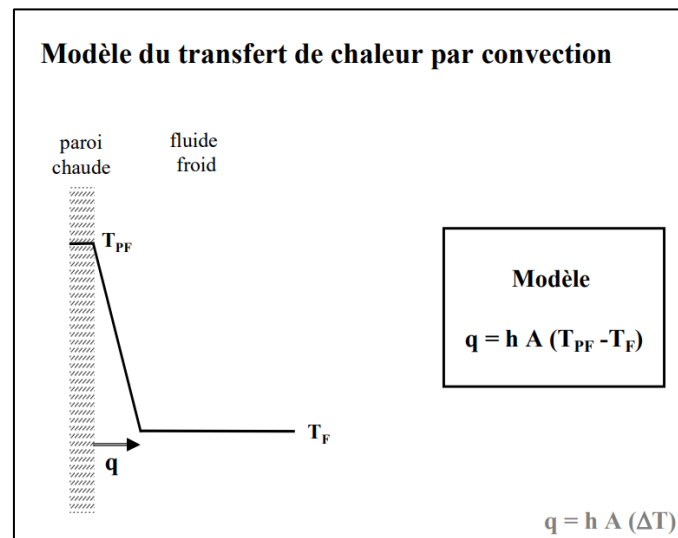


Figure 1. Modélisation d'un transfert thermique.

Avec : h ($W.m^{-2}.K^{-1}$) le coefficient de transfert de chaleur, A (m^2) la surface d'échange et ΔT (K) la différence de température (force motrice du transfert).

b. ÉCHELLE LOCALE

Le transfert entre les deux fluides repose sur trois phénomènes physiques : convection au sein du caloporteur, conduction au sein de la paroi, convection dans le produit. Lors d'un dimensionnement rapide, on regroupe ces 3 phénomènes dans un unique coefficient global h_g qui traduit le flux provoqué par la différence de température entre les deux fluides impliqués (voir Figure 2).

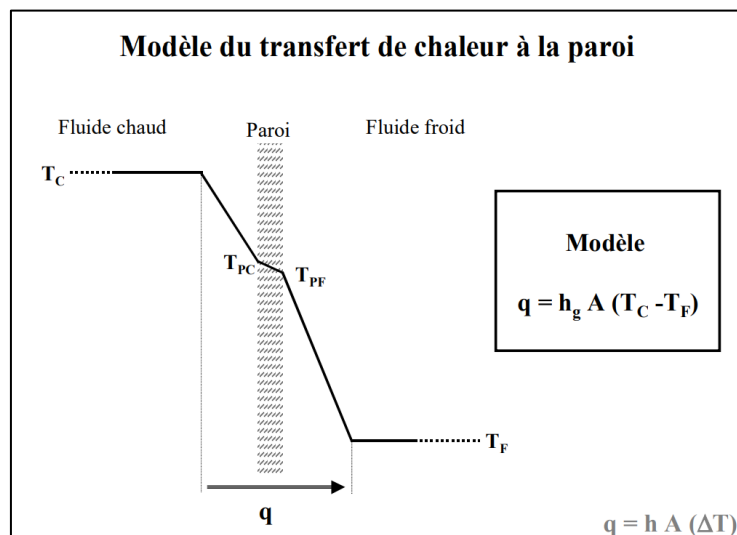


Figure 2. Modélisation du transfert thermique à l'échelle locale (cas d'une plaque plane infinie).

c. ÉCHELLE GLOBALE

Afin de prendre en compte la géométrie de l'échangeur, une réécriture du gradient thermique est nécessaire. Dans le cas de deux cylindres concentriques, la différence de température doit être remplacée par $(\Delta T)_{ml}$, la moyenne logarithmique des forces motrices entre les deux extrémités de l'échangeur. Le coefficient global de transfert de chaleur h_g dans l'échangeur est établi à partir d'une relation donnée par la Figure 3. Cette relation est valable pour un échangeur à plaques et multitube à calandre mono-passe ; elle peut être utilisée pour d'autres géométries (échangeur multitube à calandre multi-passe) moyennant l'utilisation d'un facteur correctif.

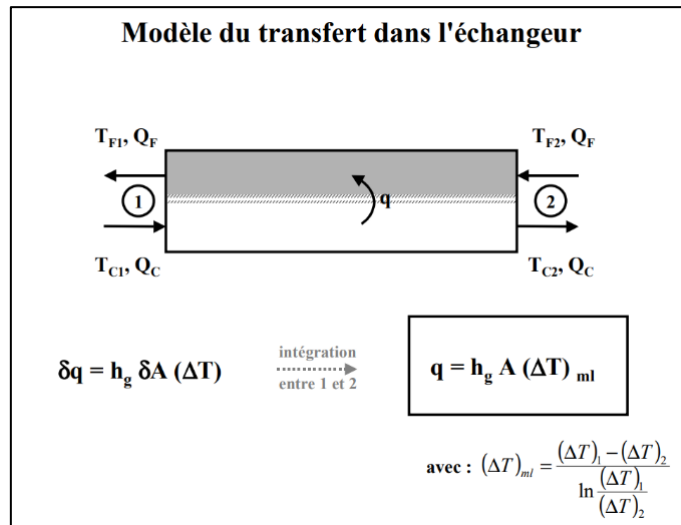


Figure 3. Modélisation du transfert de chaleur global dans un échangeur à tubes concentriques.

d. APPLICATION NUMERIQUE

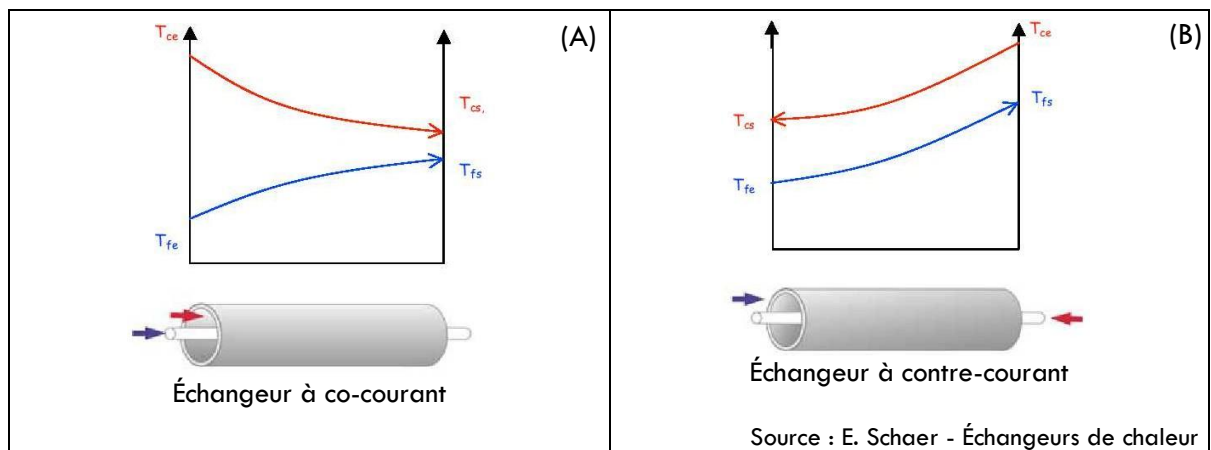
Dans la dernière relation présentée, la surface A peut être déduite des données fournies par le constructeur. Le terme $(\Delta T)_{ml}$ est calculé à l'aide des températures relevées pour chaque point stationnaire. Le flux thermique échangé est établi à l'aide d'un bilan thermique.

Remarque : Les informations expérimentales sont nombreuses, quelquefois redondantes et parfois incohérentes. Justifier les choix que vous faites lorsque vous exploitez l'une ou l'autre des valeurs que vous avez mesurées. Préciser le raisonnement ou la méthode qui vous ont conduit à ces choix.

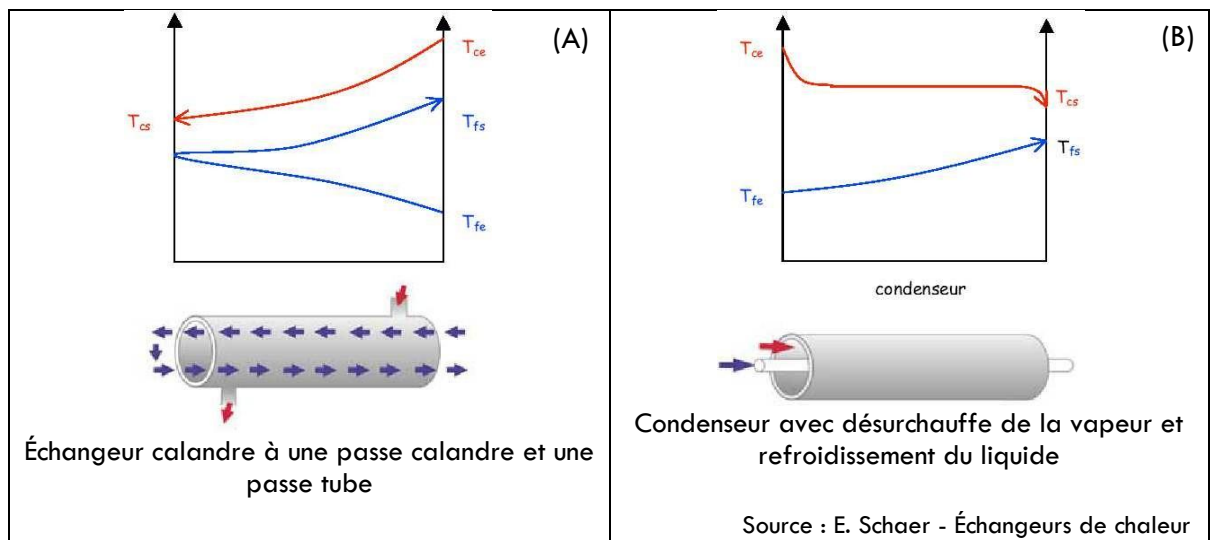
B. PROFILS DE TEMPERATURE

Les profils de température des fluides le long de leur progression dépendent du sens d'écoulement de l'un par rapport à l'autre, comme l'indiquent les Figures 4 et 5.

Dans le cas d'un échangeur à **co-courant** (Figure 4, A), l'écart entre les températures des fluides chaud et froid diminue au fur et à mesure de l'avancée dans l'échangeur, ce qui diminue la force motrice de l'échange et donc le transfert thermique. Si l'échangeur est suffisamment long, les températures des deux fluides sont égales à la sortie. Dans un échangeur à **contre-courant** (Figure 4, B), la force motrice est quasiment constante sur toute la longueur de l'échangeur, et le fluide à chauffer peut en sortir plus chaud que le fluide caloporteur refroidi. Cette configuration fournit la meilleure performance thermique.



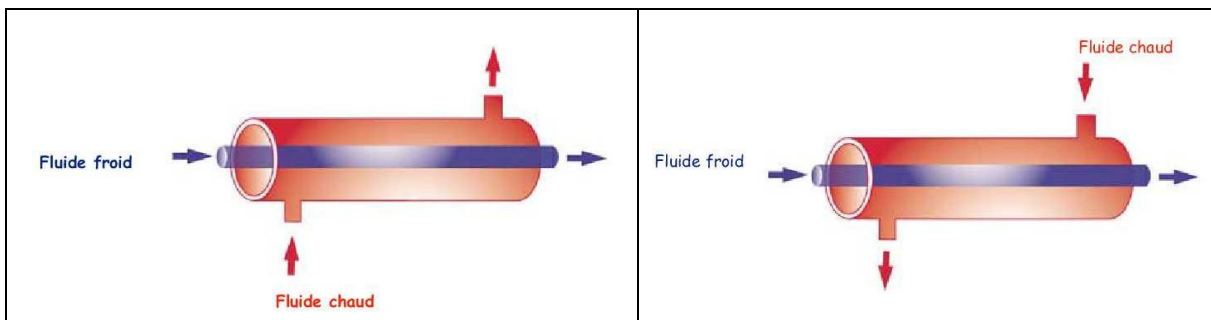
Dans le cas d'un échangeur bitube multi-passe (Figure 5, A), le transfert thermique se fait alternativement à co- et contre-courant. Enfin, dans un condenseur (Figure 5, B), le profil de température observé correspond aux étapes suivantes : refroidissement de la vapeur, liquéfaction à température constante, refroidissement du liquide.



C. PRINCIPAUX ECHANGEURS DE CHALEUR

a. ÉCHANGEUR BITUBE

Dans un échangeur à tubes concentriques (bitube), le fluide froid circule dans un cylindre interne tandis que le caloporteur circule dans la gaine externe (conduite annulaire). Ces deux conduites sont séparées par une paroi en inox au travers de laquelle s'effectue le transfert de chaleur (voir Figure 6).



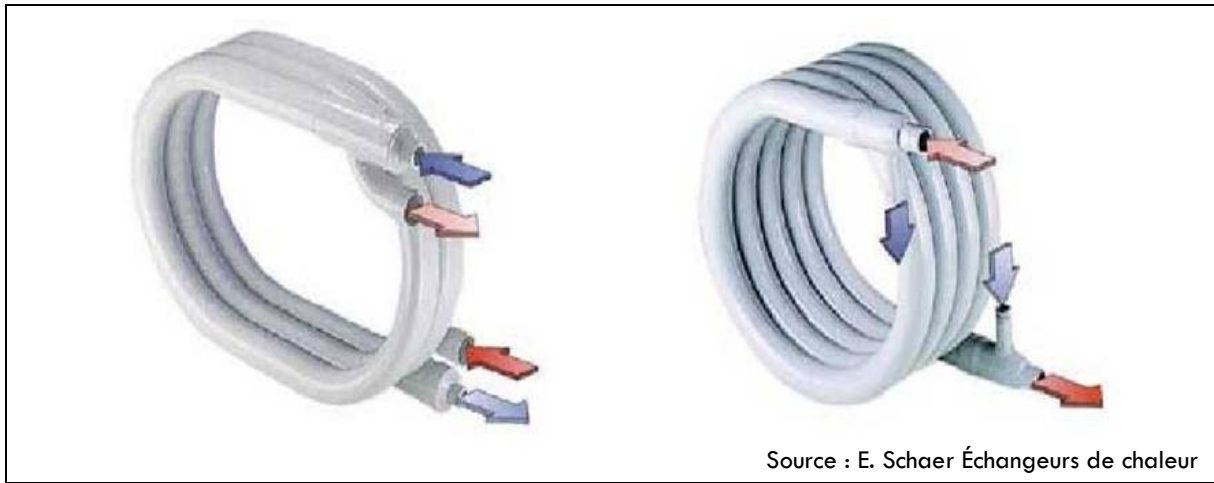


Figure 6. Exemples d'échangeurs bitubes.

Ces échangeurs sont couramment rencontrés dans les industries car ils sont faciles de fabrication, d'entretien, et de faible coût. Leurs gammes de pression, de température et de viscosité sont larges, ce qui permet leur utilisation pour des aliments très visqueux (ex : soupes). Leur compacité est néanmoins moyenne, ainsi que leurs performances de transfert thermique. Ils seront donc limités aux faibles puissances thermiques échangées.

b. ÉCHANGEUR MULTITUBE

Ces échangeurs fonctionnent de la même manière que les échangeurs précédents mais le tube central précédemment unique est désormais subdivisé en plusieurs petits tubes. Ces tubes sont placés dans une calandre qui contient le fluide chaud (voir Figure 7). Les performances de l'échangeur peuvent être améliorées en complexifiant la circulation des fluides (pour plus de turbulence : ajout de chicanes, échangeur multi-passe). Ces améliorations permettent de limiter le principal inconvénient de l'échangeur multitube mono-passe : sa longueur. Les échangeurs de chaleur multi-passe permettent ainsi d'améliorer largement la compacité des installations.

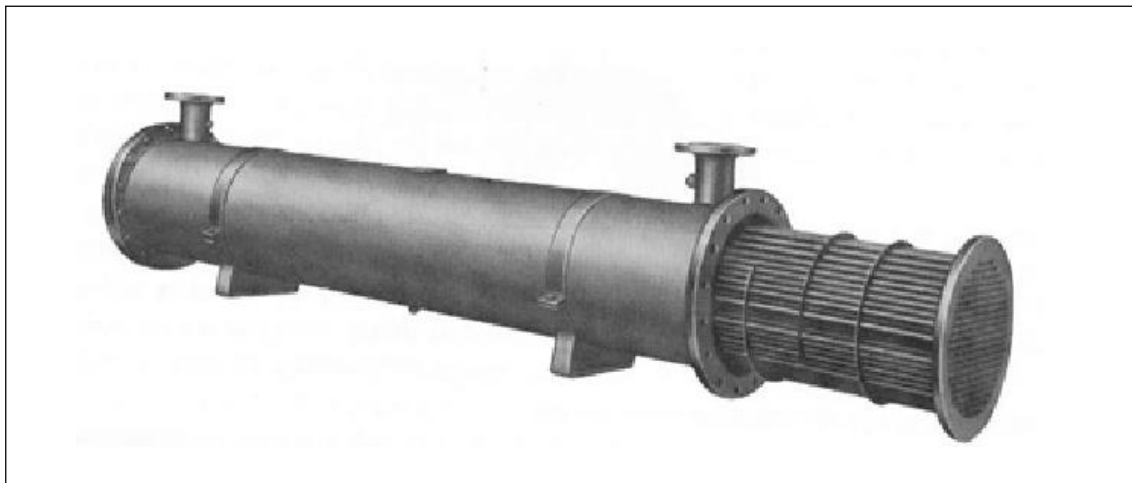


Figure 7. Vue éclatée d'un échangeur multitube.

c. ÉCHANGEUR A PLAQUES

Le fonctionnement des échangeurs à plaques est basé sur la mise en circulation alternée du fluide chaud et du fluide froid entre des plaques placées en parallèle (voir Figure 8). Chaque fluide ne passe qu'une seule fois entre deux plaques (le flux initial est divisé en entrée de système). Les plaques sont corruguées (présence de cannelures en paroi) ce qui permet d'augmenter la turbulence en surface et donc le transfert thermique. Néanmoins, le design de ces échangeurs induit des pertes de charge importantes, qui doivent être prises en compte lors du dimensionnement des appareils. Ces échangeurs sont utilisés notamment pour la pasteurisation du lait mais sont déconseillés pour les produits visqueux (risque d'encrassement et de bouchage).

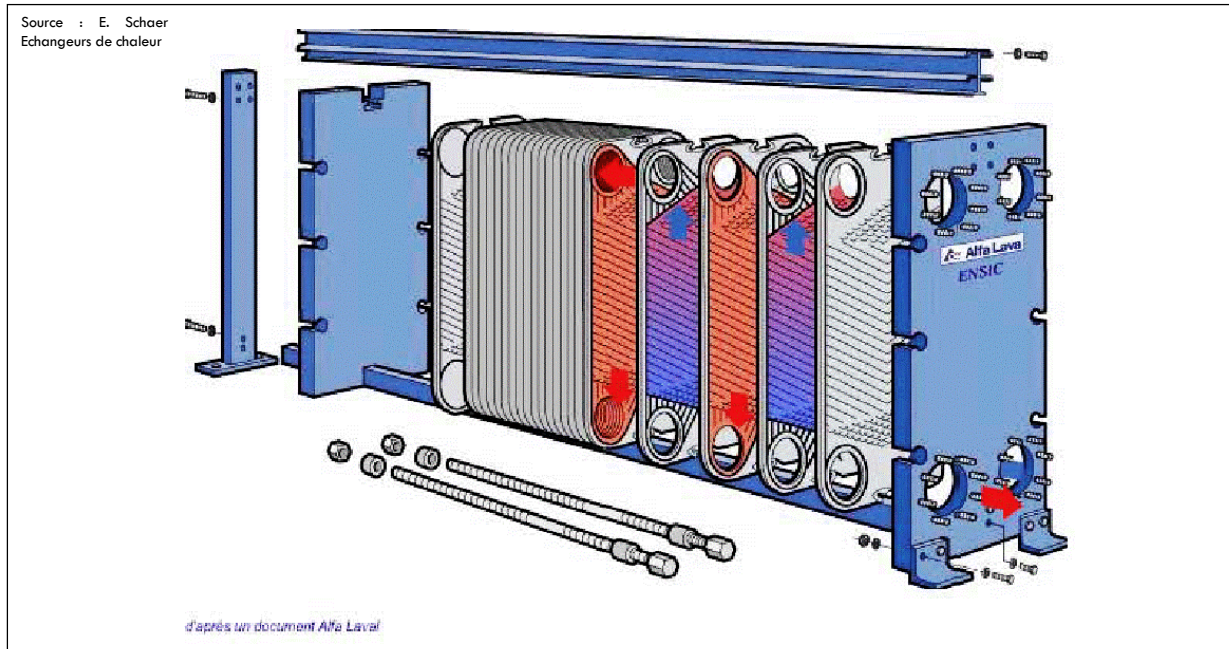


Figure 8. Vue éclatée d'un échangeur à plaques.

3. MATERIEL ET METHODES

A. FLUIDES

- Le fluide caloporteur utilisé est de l'eau chaude (mélange vapeur + eau froide dans un mélangeur statique situé à l'entrée du pilote).
- Le fluide aliment modèle à réchauffer est de l'eau froide.

A. PILOTE

Le pilote est constitué des éléments suivants :

- Un échangeur thermique tubulaire, un échangeur à plaques, un échangeur multitube. Leur surface d'échange est identique et vaut $A = 0,14 \text{ m}^2$.
- Des rotamètres permettant le réglage des débits volumiques de fluide.
- Des sondes thermiques permettant la mesure des températures de fluides.
- Un afficheur de température.
- Un générateur de vapeur (situé dans la salle principale de la halle H3).

B. PROTOCOLE EXPERIMENTAL

- Brancher les tuyaux selon la configuration (co- ou contre-courant) et les sondes de température.
- Fixer les conditions opératoires de l'échangeur (débits des fluides, pression de vapeur).
- Attendre la mise en état stationnaire (température de sortie de l'aliment d'environ 30°C)
- Relever toutes les informations disponibles à l'état stationnaire.
- Reprendre ces opérations en changeant les conditions opératoires, comme indiqué dans le tableau ci-dessous.

Tableau 1. Conditions opératoires testées.

Échangeur	Débit d'eau froide (%)	Débit de fluide caloporteur (%)	Sens de circulation des fluides	Nombre de répétitions
Bitube	20	20	Contre-courant	1
	20	30	Contre-courant	3
	20	30	Co-courant	1
Multitube	20	20	Contre-courant	1
	20	30	Contre-courant	1
	20	30	Co-courant	1
Plaques	20	20	Contre-courant	1
	20	30	Contre-courant	1
	20	30	Co-courant	1

4. EXPLOITATION DES RESULTATS

Relever la quantité d'eau consommée lors du TP et remplir l'Excel du projet Val-EAU (onglet Echangeur).

- Déterminer pour chacune des conditions opératoires **le coefficient global de transfert thermique** h_g . Le premier calcul sera détaillé et expliqué. Les autres pourront être synthétisés sous forme de tableaux avec les principaux calculs. L'enseignant vous donnera plus de détails.
- Discuter l'impact des conditions opératoires selon les valeurs des coefficients de transfert thermiques déterminés.
- Tracer les **profils de température pour le bitube**. Interpréter les profils obtenus.
- Comparer les **3 répétitions pour l'expérience bitube**. Calculer l'écart-type et l'intervalle de confiance à 95 %. Conclure sur la précision des mesures et la variabilité du procédé.

Réaliser et envoyer par mail à l'enseignant encadrant (cf. mail en début d'énoncé) dans les 7 jours (weekend inclus, vacances et jours fériés inclus) suivant la date du TP. Le fichier Excel devra regrouper les résultats des différentes expériences et contenir les formules de calcul (paramétrisation des calculs, conversion automatique des unités), et être clair et synthétique.

5. NOMENCLATURE

A	Aire de la surface d'échange	(m ²)
h	Coefficient de transfert thermique	(W·m ⁻² ·K ⁻¹)
h_g	Coefficient de transfert thermique global	(W·m ⁻² ·K ⁻¹)
ΔT	Différence de température entre les fluide chaud et froid	(K)
ΔT_{ml}	Moyenne logarithmique de la différence de température entre les deux fluides	(K)
$T_{ce}, T_{fe}, T_{cs}, T_{fs}$	Températures d'entrée du fluide chaud, d'entrée du fluide froid, de sortie du fluide chaud et de sortie du fluide froid	(K)