



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne Démocratique et Populaire
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
Ministère de l'Enseignement Supérieure et de la Recherche Scientifique

جامعة وهران 2 محمد بن أحمد
Université d'Oran 2 Mohamed Ben Ahmed

معهد الصيانة والأمن الصناعي
Institut de Maintenance et de Sécurité Industrielle

Département de Maintenance en Electromécanique

MÉMOIRE

Pour l'obtention du diplôme de Master

Filière : Génie Industriel
Spécialité : Maintenance-Fiabilité-Qualité

Thème

**Simulation d'un échangeur de chaleur utilisant
SolidWorks**

Présenté et soutenu par :

Nom : YAHIAOUI **Prénom :** Abderzak

Nom : SAADI **Prénom :** Akram

Devant le jury composé de :

Nom et Prénom	Grade	Etablissement	Qualité
BELHADRI Kheira	MCB	Université d'Oran 2	Président
ABDI Ghezail	MCA	Université d'Oran 2	Encadreur
ACHACHE Habib	MCA	Université d'Oran 2	Examineur

Année 2023/2024

Remerciements

باسم الله الرحمن الرحيم

Au début, nous aimerions remercier Dieu, qui nous a donné la santé, la volonté et le courage de faire cela.

Nous tenons également à exprimer nos sincères remerciements à tous les enseignants qui ont contribué à notre formation.

Nous souhaitons également adresser nos remerciements spéciaux à notre superviseur, le Professeur Abdi Ghezail, pour son soutien indéfectible, ses conseils précieux et ses orientations malgré ses engagements professionnels.

Nous aimerions également remercier les membres honorables de la Commission d'arbitrage qui ont accepté sans réserve de juger et d'évaluer ce travail.

Nous sommes également très reconnaissants envers tous nos collègues et nos familles, en particulier nos chers parents, pour leur soutien constant et l'atmosphère merveilleuse qu'ils ont créée tout au long de ce parcours.

Enfin, je remercie sincèrement tous ceux qui ont contribué directement ou indirectement à la réalisation de ce travail.

Dédicace

Je dédie ce travail aux personnes les plus importantes de ma vie : mes parents qui m'ont soutenu inconditionnellement, tous les membres de ma famille qui ont toujours cru en moi, tous mes amis qui ont partagé des moments précieux avec moi, ainsi qu'à toutes les personnes qui ont contribué, directement ou indirectement, au développement de ce travail.

ABDERZAK

Dédicace

Je dédie cette remise de diplôme à ma chère famille et à mes amis bien-aimés, ainsi qu'à tous ceux qui m'ont soutenu et accompagné dans ce parcours éducatif. Vous avez été un véritable soutien et une source d'inspiration tout au long de ces années. Merci pour votre motivation continue et votre grande confiance en mes capacités.

AKRAM

Abstract:

A heat exchanger is a device for transferring thermal energy from one fluid to another, without mixing. The heat flux passes through the exchange surface that separates the fluids. most of the time, this method is used to cool or warm a liquid or a gas that is impossible or difficult to cool or heat directly. For the first time in our institute, we started the design and simulation of a heat exchanger against current on SolidWorks software to predict the actual performance of the installed heat exchanger. We find that the numerical simulations obtained are generally very consistent with the observations in addition to providing very relevant information.

Keywords: heat exchanger, tube, shell, SOLIDWORKS2016, Design.

Résumé :

Un échangeur de chaleur 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 qui sépare les fluides. La plupart du temps, on utilise cette méthode pour refroidir ou réchauffer un liquide ou un gaz qu'il est impossible ou difficile de refroidir ou chauffer directement. Pour la première fois dans notre institut on a entamé la conception et la simulation d'un échangeur de chaleur à contre-courant sur le logiciel SolidWorks pour prévoir les performances réelles de l'échangeur de chaleur installé. On trouve que les simulations numériques obtenues sont généralement très consistantes avec les observations expérimentales en plus de donner des informations très pertinentes.

Mots clés : échangeur à tubes et calandre, SOLIDWORKS 2016, dimensionnement.

ملخص:

المبادل الحراري هو جهاز لنقل الطاقة الحرارية من سائل إلى آخر، بدون اختلاط. يمر التدفق الحراري عبر سطح التبادل الذي يفصل السوائل. في معظم الأوقات، يتم استخدام هذه الطريقة لتبريد أو تسخين سائل أو غاز يستحيل أو يصعب تبريده أو تسخينه مباشرة.

لأول مرة في معهدنا قمنا باستعمال برنامج التصميم والمحاكاة ثلاثي الأبعاد Solid Works للمبادل الحراري معاكس الاتجاه نجد أن المحاكاة العددية التي تم الحصول عليها متطابقة مع النتائج التطبيقية بالإضافة لتقديمه معلومات جد مفيدة.

الكلمات المفتاحية: مبادل حراري، أنبوب، SOLIDWORKS 2016، تصميم.

Sommaire

Remerciement.....	
Dédicace.....	
Résumé.....	
Sommaire.....	
Liste des figures.....	
Nomenclature.....	
Introduction générale.....	1

Chapitre I : GENERALITES SUR LES ECHANGEURS THERMIQUE

I.1 Introduction.....	3
I.2 Mode de transfert de chaleur.....	4
I.3 Principe d'un échangeur de chaleur.....	4
I.3.1. Circulation à co-courant.....	5
I.3.2. Circulation à contre-courant	5
I.3.3. Circulation à deux passes (côté tube).....	6
I.4 Calculs de flux échangés, cédés, reçus	7
I.4.1. Circulation à contre-courant	8
I.4.2. Circulation à co-courant.....	9
I.4.3. Circulation à 2 passes côté tubes	9
I.4.4. Circulation à 2 passes côté tubes	10
I.5. Différents types d'un échangeur de chaleur.....	11
I.5.1. Echangeur à tubes en U.....	11
I.5.2. Echangeur à faisceau tubulaire horizontal	12
I.5.3 Echangeur à faisceau tubulaire vertical	14
I.5.4. Echangeur à spirales :	15
I.5.5. Echangeur à plaques	16
I.5.6. Colonne de Bouhy.....	18
I.5.7. Echangeur à bloc	19
I.5.8. Echangeur à ailettes	21

Chapitre II : NOTIONS SUR LES ECHANGEURS DE CHALEUR

II.1 Généralités	25
II.2 Classification des échangeurs selon le sens relatif d'écoulement des 2 fluides.....	25
II.3 Distribution des températures dans un échangeur	26
II.4 Evaluation des performances thermiques d'un échangeur en régime permanent	26
II.4.1 Expression du flux élémentaire, $d\phi$ échangé entre les deux fluides à travers un élément dS de la surface d'échange.....	26

II.4.2 Méthodes de calcul thermique d'un échangeur	27
II.4.3 Méthode ΔTLM	27
II.5 Le coefficient d'échange global (k)	29
II.5.1 Cas d'une paroi plane ou à grand rayon de courbure	29
II.5.2 Cas de parois tubulaires	30
II.5.3 Cas de surface ailettes.....	31
II.6 METHODE "NUT"	31
II.6.1 Efficacité d'un échangeur (E).....	31
II.6.2 Expression du flux réel échangé :	32
II.6.3 Expressions de E pour quelques configurations d'écoulement	33
II.6.3.1 Echangeur à courant parallèles	33
II.6.3.2 Echangeur à contre -courant pur.....	33
II.6.4 marches à suivre pour le calcul d'un échangeur par la méthode NUT :	33
II.7 Comparaison des méthode ΔTLM et NUT.....	34

Chapitre III : RESULTATS ET DISCUSSIONS

III.1. Introduction	38
III.2. Présentation du logiciel SolidWorks	38
III.2.1. SOLIDWORKS Simulation	38
III.2.2. Ecoulement des fluides sur SolidWorks (SolidWorks Flow Simulation).....	39
III.2.3. Cycle de conception avec SolidWorks Flow Simulation :	39
III.2.4. Objectifs de l'analyse.....	40
III.2.5. Création de géométrie	40
III.2.6. Maillage :.....	40
III.2.7. Visualisation des résultats	41
III.3. Formulation du problème	42
III.3.1. Structure de l'écoulement dans un échangeur de chaleur à tube et calandre	45
III.3.2. Domaine de calcul.....	46
III.3.3. Conditions initiales.....	47
III.3.4. Conditions aux limites.....	48
III.4. Hypothèses simplificatrices.....	49
III.5. Résultats et Discussions	50
III.5. 1 Profil de vitesse dans un échangeur thermique pour un débit massique du fluide chaud	50
III.5. 2 Profil de température dans un échangeur thermique	51
III.5. 3 Profil de température dans un échangeur thermique à l'extérieur.....	54
III.5. 4 Profil de trajectoires d'écoulement	55

Conclusion générale	56
Références bibliographiques	58

LISTE DES FIGURES

CHAPITRE I : GENERALITES SUR LES ECHANGEURS THERMIQUE

Figure.I.1.Pour les lois du transfert thermique, se référer à un cours plus complet.....	4
Figure I 2 Circulation à co-courant.....	6
figure I 3 Profil échangeur à 1 passe coté tube	5
figure.I.4. Circulation à contre-courant.....	6
figure I 5. Profil échangeur à 1 passe coté tube	6
Figure. I. 6 .Circulation à 2 passes.....	7
figure I.7. Profil échangeur à 2 passes coté tube	7
Figure I 8. Circulation à contre-courant	8
Figure I 9. Circulation à co-courant	9
Figure I 10. Circulation à 2 passes côté tubes	10
Figure I 11. Circulation à 2 passes coté tubes	11
Figure I 12. Schéma d'un échangeur à tubes en U	11
Figure I 13. Schéma d'un échangeur tubulaire	12
Figure I 14: Schéma d'un échangeur tubulaire	14
Figure I 15. Schéma d'un échangeur à spirale.....	15
Figure I 16. Schéma d'un échangeur plaques.....	16
Figure I 17. Colonne de Bouhy	18
Figure I 18. Schéma d'un échangeur à bloc complexe	19
Figure I 19. Schéma d'un échangeur à bloc simple	19
Figure I 20. Échangeur eau/air d'automobile	21

CHAPITRE II : NOTIONS SUR LES ECHANGEURS DE CHALEUR

Figure II 1. Echangeur à circulation méthodique pour refroidissement de gaz chauds.....	25
Figure II 2. Courants parallèles avec contre-courant	26
Figure II 3. Schéma du transfert thermique à travers une paroi plane d'un échangeur [5]	29
Figure II 4. Schéma analogique.....	30
Figure II 5. Echangeur a tube coaxial (schéma d'une coupe de tube à droite)	30

CHAPITRE III : RESULTATS ET DISCUSSIONS

Figure. III. 1. Cycle de conception avec SolidWorks Flow Simulation.....	39
Figure. III. 2. Module de création de géométrie sur SolidWorks.....	40
Figure. III. 3. Création de maillage sur SolidWorks	41
Figure. III. 4. Visualisation et représentation des résultats sur SolidWorks.	42
Figure. III. 5. Schéma détaillé de la géométrie de la calandre de l'échangeur de chaleur	43
Figure. III. 6. Géométrie d'un échangeur de chaleur à tube et calandre.	45
Figure. III. 7. Structure de l'écoulement dans un échangeur de chaleur à tube et calandre.....	46
Figure. III. 8. Domaine de calcul	47
Figure. III. 9. Profil de vitesse dans un échangeur thermique pour un débit massique du fluide chaud	50
Figure. III. 10. Profil de température à l'intérieur de l'échangeur thermique.....	51
Figure III. 11. Tous les Températures.....	52
Figure III.12. Chaude température de Sortie.....	52

<i>Figure III. 13. température froide avec température chaude</i>	53
Figure. III. 14. Distribution de température dans l'extérieur 'coq' de l'échangeur de chaleur	54
Figure. III. 15. Flux de fluide à l'intérieur de l'échangeur de chaleur	55

Tableaux :

Table. III. 1. Dimensions de l'échangeur de chaleur.	44
<i>Table. III. 2. Conditions initiales du problème.</i>	47
<i>Table. III. 3. Conditions aux limites.</i>	48

Nomenclature

Symbole	Désignation	Unité
S	Surface d'échange	m ²
ds	Surface d'échange élémentaire	m ²
L	Longueur des tube	m
L	Largeur de l'échangeur de chaleur	m
K	Coefficient d'échange global	W / m ² K
h_c	Coefficient de convection coté fluide chaud	W / m ² K
h_f	Coefficient de convection coté fluide froid	W / m ² K
Cp	Chaleur spécifique à pression constante	J/ kg K
T	Température	C°
Tc	Température du fluide chaud	C°
Tf	Température du fluide froid	C°
ΔT_{LM}	Différence de température logarithmique moyenne	C°
NUT	Nombre d'unités de transfert	//
ρ	Masse volumique	Kg.m ⁻³
Φ	Flux thermique	W
F	Coefficient de correction de DTLM	//
F	Coefficient de frottement	//
$\dot{m} \cdot c_p (C)$	Débit calorifique du fluide	KJ/h °C
Δp	Chute de pression	Pa
Λ	Conductivité thermique	W/m k
ΔT	Différence de température	C°
\dot{m}_c	Débit massique du fluide chaud	Kg /s
\dot{m}_f	Débit massique du fluide froid	Kg/s
Re	Résistance d'encrassement	m ² k/w
E	Epaisseur du paroi	m
R	Rayon	m
C	Débit calorifique ou unitaire	KW /kg
E	Efficacité de l'échangeur	//

Introduction

Introduction générale

Tout système de production énergétique induit durant son fonctionnement l'interaction entre les composants chimiques et les équipements siège de ces réactions, ces derniers doivent être conçus de manière à offrir les conditions optimales de fonctionnement.

A cette condition s'ajoutent souvent l'obligation de réaliser un compromis avec les émanations thermiques, c'est une tâche à réaliser par le thermo technique en tant que spécialité de l'ingénierie énergétique.

Ce compromis s'apparente beaucoup plus à un défi qu'à une application de formules, Ce travail est le plus généralement appelé une optimisation ou une exploitation des expériences accumulées tout au long de l'étude et le dimensionnement des installations thermo énergétiques. Les techniques actuelles se basent avant tout sur une modélisation reposant sur un système d'équations reflétant les hypothèses émises par le concepteur d'une part et les contraintes imposées par le fonctionnement et les données économiques.

Pour notre cas, la production thermique accompagnant la production énergétique se doit être dans les limites « normales » tolérées par les composants sinon il doit être prévu l'évacuation de ce surplus de chaleur indésirable comme, c'est le cas de centrale thermique ou nucléaire.

En général, ces centrales font appel à des évacuateurs de chaleur sous forme d'échangeur de chaleur.

Cette mémoire étudie l'évolution de température des deux fluides en fonction de leurs vitesses Les résultats obtenus permettront de voir leurs évolutions en Trois dimensions en utilisant le logiciel de conception et simulation SolidWorks.

Organisation du travail

Ce mémoire est constitué de trois chapitres. En premier lieu, nous présenterons des généralités sur les échangeurs de chaleur, en mettant principalement l'accent sur leur mode de transfert et principes de fonctionnement nous expliquerons les différents types d'un échangeur de chaleur.

Nous verrons ensuite dans le deuxième chapitre notions sur les échangeurs de chaleur.

La présentation des résultats débute aux troisièmes chapitres, la présentation des résultats de simulation sur des configurations interpréter, enfin nous concluons ce mémoire.

Chapitre 1 :

Généralités sur les échangeurs thermiques

I.1 Introduction

Un échangeur de chaleur 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 qui sépare les fluides. La plupart du temps, on utilise cette méthode pour refroidir ou réchauffer un liquide ou un gaz qu'il est impossible ou difficile de refroidir ou chauffer directement, par exemple l'eau d'un circuit primaire de refroidissement, d'une nucléaire. L'échangeur de chaleur le plus commun est celui à plaques. De nouveaux échangeurs à fils fins permettent des échanges eau/air à très faibles écarts de température en chauffage ou refroidissement.

Un échangeur de chaleur dispositif dans lequel se réalise un transfert thermique entre deux milieux dû à une différence de température entre les milieux. Dans les maisons à très basse consommation énergétique ou à énergie positive, un système de ventilation à double flux peut intégrer un échangeur réchauffant l'air entrant avec les calories prélevées dans l'air sortant.

I.2 Mode de transfert de chaleur

Il y a trois principaux modes de transferts de chaleur :

- **Conduction** : le flux de chaleur traverse le corps A, l'interface A B, et le corps B. Le flux est proportionnel à la conductivité thermique du matériau.
- **Convection** : le flux de chaleur est transporté par la matière en déplacement. Ses mouvements sont dits de convection naturelle sous l'influence de variations de densité et du champ de pesanteur, ou de convection forcée si le fluide est mis en circulation par une pompe ou une différence de pression.
- **Rayonnement** : le flux de chaleur est transporté sans transport de matière, sous forme d'ondes électromagnétique (ex : rayonnement solaire).

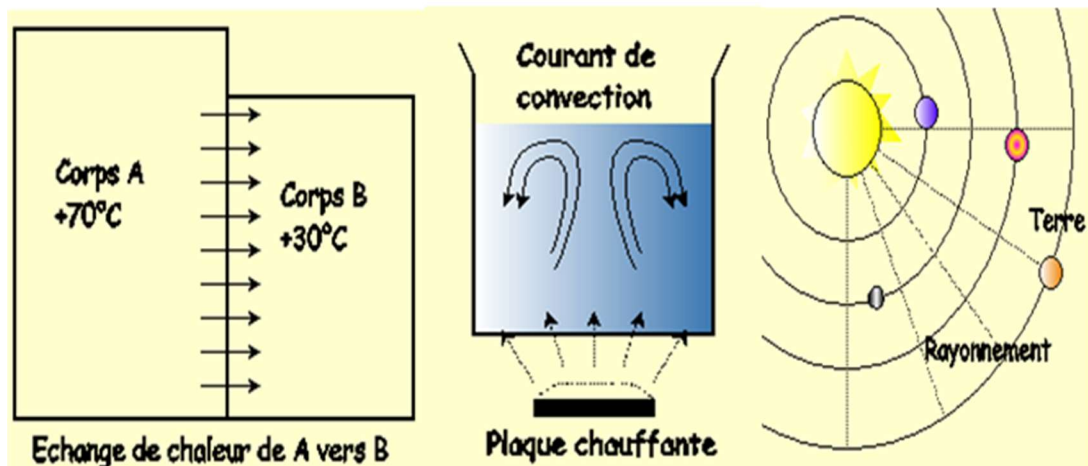


Figure.I.1. Pour les lois du transfert thermique, se référer à un cours plus [11]

I.3 Principe d'un échangeur de chaleur

On cherche en général à transférer un flux de chaleur entre un fluide chaud et un fluide froid, séparés par une paroi qui peut être plane ou tubulaire.

La chaleur est transférée par conduction et/ou convection au sein de chaque fluide, et par conduction au sein du matériau qui les sépare.

Il peut également y avoir transfert par rayonnement si le niveau des températures dépasse 100°C.

Dans l'échangeur, chacun des fluides s'échauffe, se refroidit, ou change d'état selon ses caractéristiques et les conditions opératoires.

Le flux de chaleur résultant, cédé par le fluide chaud et reçu par le fluide froid est proportionnel à :

- Un coefficient d'échange thermique "global" noté K (ou U), fonction des conditions d'écoulement, des conductivités thermiques de chaque fluide, des viscosités, du changement d'état, etc...
- Un écart de température (en général une moyenne logarithmique des écarts de température entre les deux fluides à chaque extrémité de l'échangeur).
- La surface d'échange thermique utilisée.

$$\Phi = K S \Delta\theta_{ml} \quad (\text{I-1})$$

Avec K coefficient global en $\text{kJ.h}^{-1}.\text{m}^{-2}.\text{°C}^{-1}$ et Φ en kJ.h^{-1} .

I.3.1. Circulation à co-courant

Les fluides 1 (froid) et 2 (chaud) entrent d'un même côté de l'appareil, circulent en parallèle, et sortent à l'autre extrémité.

L'écart de température à l'extrémité gauche (ici entrée) est $T_{e2}-T_{e1}$.

L'écart de température à l'extrémité droite (ici sortie) est l'écart de température moyen dans l'appareil est la moyenne logarithmique des écarts de température à chaque extrémité, soit

$$\Delta\theta_{ml} = [(T_{e2}-T_{e1}) - (T_{s2}-T_{s1})] / \ln [(T_{e2}-T_{e1}) / (T_{s2}-T_{s1})] \quad (\text{I-2})$$

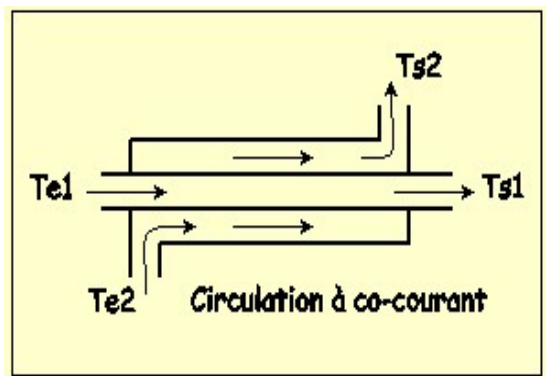


Figure I.2. Circulation à co-courant

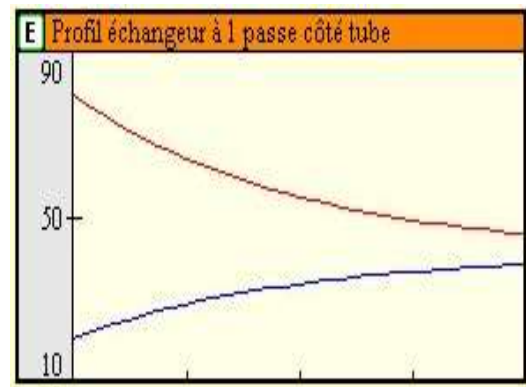


Figure I.3. Profil échangeur à 1 passe côté tube

I.3.2. Circulation à contre-courant

Les fluides 1 et 2 entrent des côtés opposés de l'appareil et circulent en sens contraire.

L'écart de température à l'extrémité gauche (sortie chaude, entrée froide) est $T_{s2}-T_{e1}$

L'écart de température à l'extrémité droite (entrée chaude, sortie froide) est $Te_2 - Ts_1$

L'écart de température moyen dans l'appareil est la moyenne logarithmique des écarts de température à chaque extrémité, soit

$$\Delta\theta_{ml} = [(Te_2 - Ts_1) - (Ts_2 - Te_1)] / \ln [(Te_2 - Ts_1) / (Ts_2 - Te_1)] \quad (I-3)$$

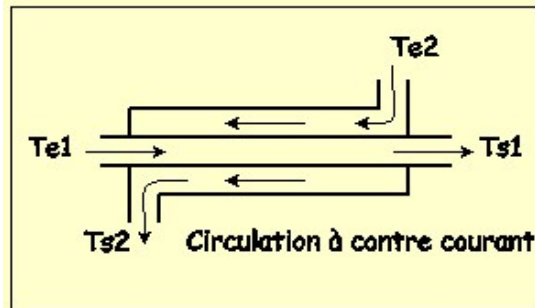


figure.I.4. Circulation à contre-courant



Figure I.5. Profil échangeur à 1 passe côté tube

I.3.3. Circulation à deux passes (côté tube)

Un des fluides (ici le fluide 1) entre et sort à la même extrémité de l'appareil, en faisant demi-tour à l'autre extrémité.

Une partie du trajet du fluide est donc à co-courant, l'autre étant à contre-courant.

Dans ce cas, la moyenne logarithmique doit être calculée comme lors du montage à contre-courant, et corrigée d'un facteur Y compris entre 0.6 et 1 fourni par des abaques, soit :

$$\Phi = K S Y \Delta\theta_{ml} \quad (I-4)$$

Avec

$$\Delta\theta_{ml} = [(Te_2 - Ts_1) - (Ts_2 - Te_1)] / \ln [(Te_2 - Ts_1) / (Ts_2 - Te_1)] \quad (I-5)$$

D'autres montages existent avec par exemple des circulations côté tube à 4, 6 voire 8 passes, et/ou plusieurs passes côté calandre.

L'objectif est en général d'augmenter les vitesses de circulation (vitesse doublée à chaque doublement du nombre de passe) afin d'obtenir de bons coefficients d'échanges pour chaque fluide.

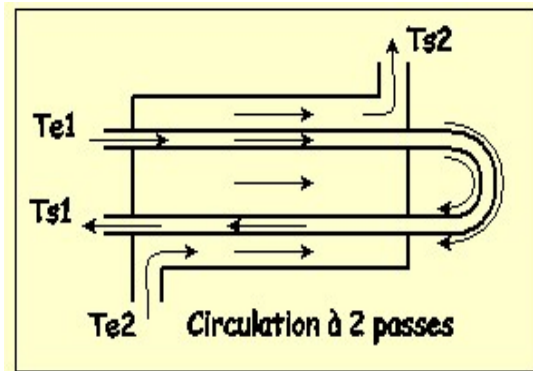


Figure.I.6. Circulation à 2 passes

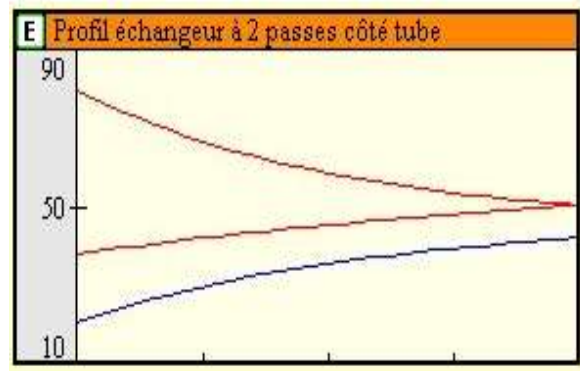


Figure.I.7. Profil échangeur à 2 passes côté tube

I.4 Calculs de flux échangés, cédés, reçus

Dans un échangeur de chaleur, on cherche en général à transférer un flux de chaleur $\Phi_{\text{échangé}}$ (en $\text{kJ}\cdot\text{h}^{-1}$) entre un fluide chaud et un fluide froid séparés par une paroi qui peut être plane ou tubulaire.

Dans tous les cas, le moteur du transfert de chaleur est l'écart de température entre fluide chaud et fluide froid, noté $\Delta\theta$. Ce flux transféré est également proportionnel au coefficient global d'échange thermique K (ou U , en $\text{kJ}\cdot\text{h}^{-1}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{°C}^{-1}$), et à la surface d'échange S (en m^2), soit la formule suivante :

$$\Phi_{\text{échangé}} = K S \Delta\theta \quad (\text{I-6})$$

Selon le montage, l'écart de température peut être :

- Constant tout au long de l'échangeur (condensation d'un côté et ébullition de l'autre, ...).
- Variable tout au long de l'échangeur (échauffement du fluide d'un côté, refroidissement de l'autre).

Lorsque la différence de température est variable et que l'échangeur fonctionne à co-courant ou à contre-courant pur, on démontre que l'écart moyen de température à prendre en compte est la moyenne logarithmique des écarts de température à chaque extrémité, noté $\Delta\theta_{ml}$, soit :

$$\Phi_{\text{échangé}} = K S \Delta\theta_{ml} \quad (\text{I-7})$$

Dans les autres cas (écart de température constant, moyenne logarithmique non définie), on prendra l'écart de température entre fluide chaud et froid le plus réaliste.

Remarque

Le coefficient d'échange se rapporte à une surface d'échange de référence, qui peut être la surface interne des tubes, la surface externe des tubes, ou la moyenne logarithmique des surfaces d'échange.

La surface de référence doit être précisée avec la valeur du coefficient d'échange (k_i , k_e , ou k_{ml} par ex).

Différents exemples de montages sont présentés ci-après, avec calcul de l'écart de température à prendre en compte dans la formule de calcul du flux échangé au travers de la paroi de séparation entre fluide chaud et fluide froid.

I.4.1. Circulation à contre-courant

Les fluides 1 et 2 entrent des côtés opposés de l'appareil et circulent en sens contraire.

L'écart de température à l'extrémité gauche (sortie chaude, entrée froide) est $T_{s2}-T_{e1}$

L'écart de température à l'extrémité droite (entrée chaude, sortie froide) est $T_{e2}-T_{s1}$

L'écart de température moyen dans l'appareil est la moyenne logarithmique des écarts de température à chaque extrémité, soit :

$$\Delta\theta_{ml} = [(T_{e2}-T_{s1}) - (T_{s2}-T_{e1})] / \ln [(T_{e2}-T_{s1}) / (T_{s2}-T_{e1})] \quad (I-8)$$

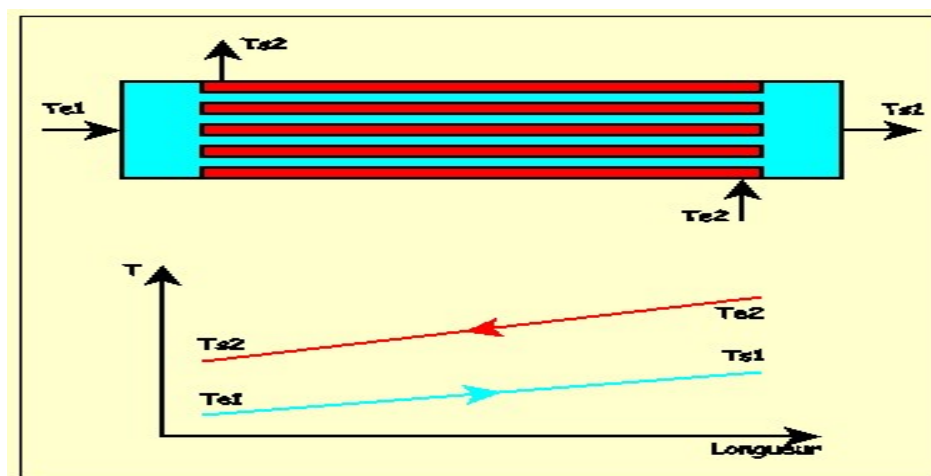


Figure I 2. Circulation à contre-courant

I.4.2. Circulation à co-courant

Les fluides 1 (froid) et 2 (chaud) entrent d'un même côté de l'appareil, circulent en parallèle, et sortent à l'autre extrémité.

L'écart de température à l'extrémité gauche (ici entrée) est $T_{e2}-T_{e1}$

L'écart de température à l'extrémité droite (ici sortie) est $T_{s2}-T_{s1}$

L'écart de température moyen dans l'appareil est la moyenne logarithmique des écarts de température à chaque extrémité, soit

$$\Delta\theta_{ml} = [(T_{e2}-T_{e1}) - (T_{s2}-T_{s1})] / \ln [(T_{e2}-T_{e1}) / (T_{s2}-T_{s1})] \quad (I-9)$$

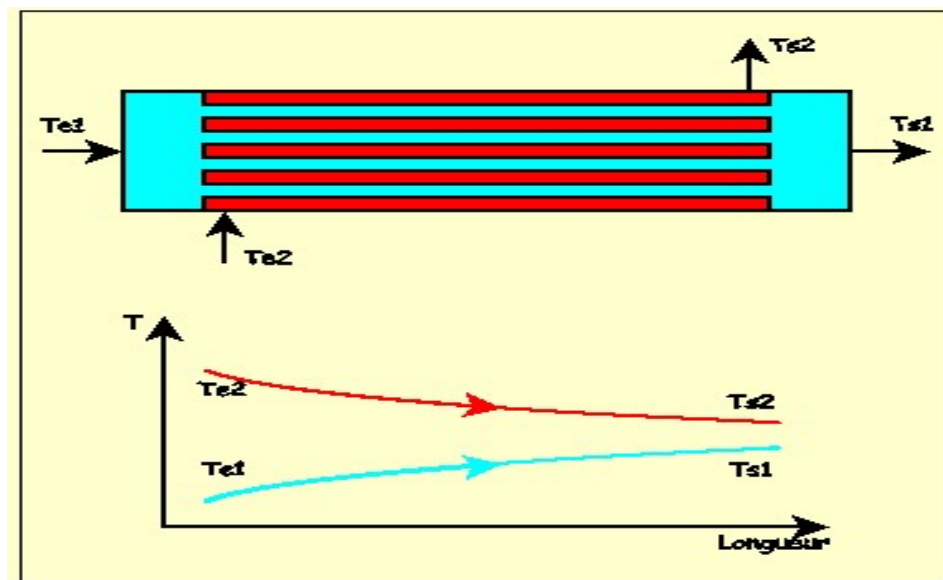


Figure I 3. Circulation à co-courant

I.4.3. Circulation à 2 passes côté tubes

Un des fluides (ici le fluide 1) entre et sort à la même extrémité de l'appareil, en faisant demi-tour à l'autre extrémité. Une partie du trajet du fluide est donc à contre-courant, l'autre étant à co-courant.

Dans ce cas, la moyenne logarithmique doit être calculée comme lors du montage à contre-courant, et corrigée d'un facteur Y compris entre 0.6 et 1 fourni par des abaques, soit :

$$\Phi_{\text{échangé}} = K S Y \Delta\theta_{ml}, \quad (I-10)$$

$$\Delta\theta_{ml} = [(T_{e2}-T_{s1}) - (T_{s2}-T_{e1})] / \ln [(T_{e2}-T_{s1}) / (T_{s2}-T_{e1})] \quad (I-11)$$

D'autres montages existent avec par exemple des circulations côté tube à 4, 6 voire 8 passes, et/ou plusieurs passes côté calandre.

L'objectif est en général d'augmenter les vitesses de circulation (vitesse doublée à chaque doublement du nombre de passe) afin d'obtenir de bons coefficients d'échanges pour chaque fluide.

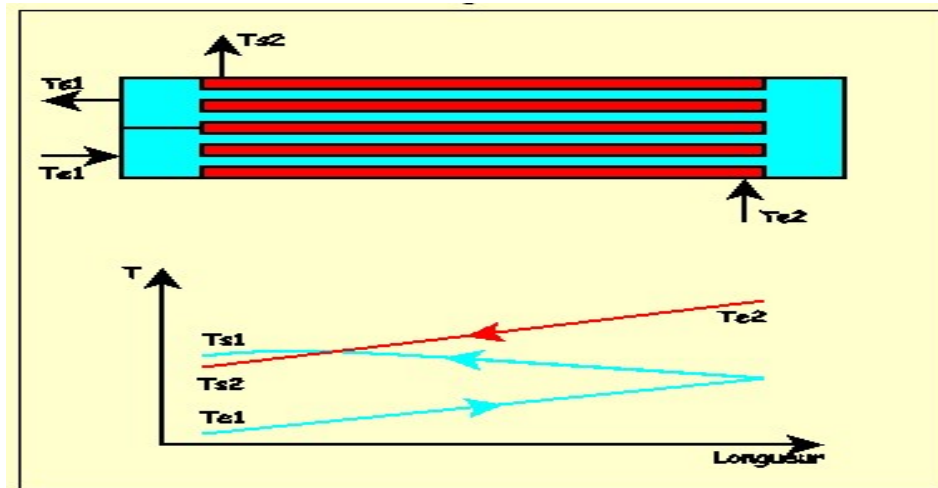


Figure I 4. Circulation à 2 passes côté tubes

I.4.4. Circulation à 2 passes côté tubes

Un des fluides (ici le fluide 1) entre et sort à la même extrémité de l'appareil, en faisant demi-tour à l'autre extrémité.

Une partie du trajet du fluides est donc à co-courant, l'autre étant à contre-courant.

Dans ce cas, la moyenne logarithmique doit être calculée comme lors du montage à contre-courant, et corrigée d'un facteur Y compris entre 0.6 et 1 fourni par des abaques, soit :

$$\Phi_{\text{échangé}} = K S Y \Delta\theta_{ml}, \quad (\text{I-12})$$

$$\Delta\theta_{ml} = [(Te2 - Ts1) - (Ts2 - Te1)] / \ln [(Te2 - Ts1) / (Ts2 - Te1)] \quad (\text{I-13})$$

D'autres montages existent avec par exemple des circulations côté tube à 4, 6 voire 8 passes, et/ou plusieurs passes côté calandre.

L'objectif est en général d'augmenter les vitesses de circulation (vitesse doublée à chaque doublement du nombre de passe) afin d'obtenir de bons coefficients d'échanges pour chaque fluide.

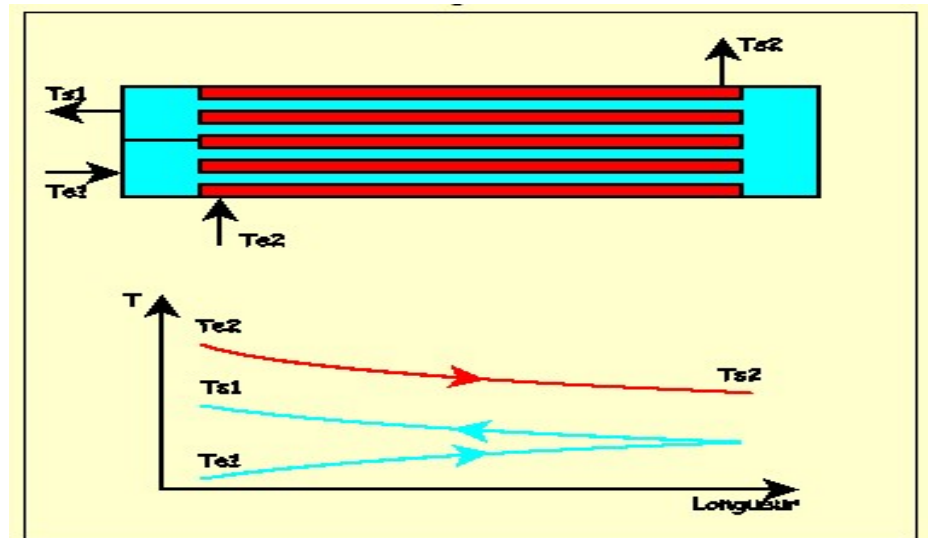


Figure I 5. Circulation à 2 passes coté tubes

I.5. Différents types d'un échangeur de chaleur

I.5.1. Echangeur à tubes en U

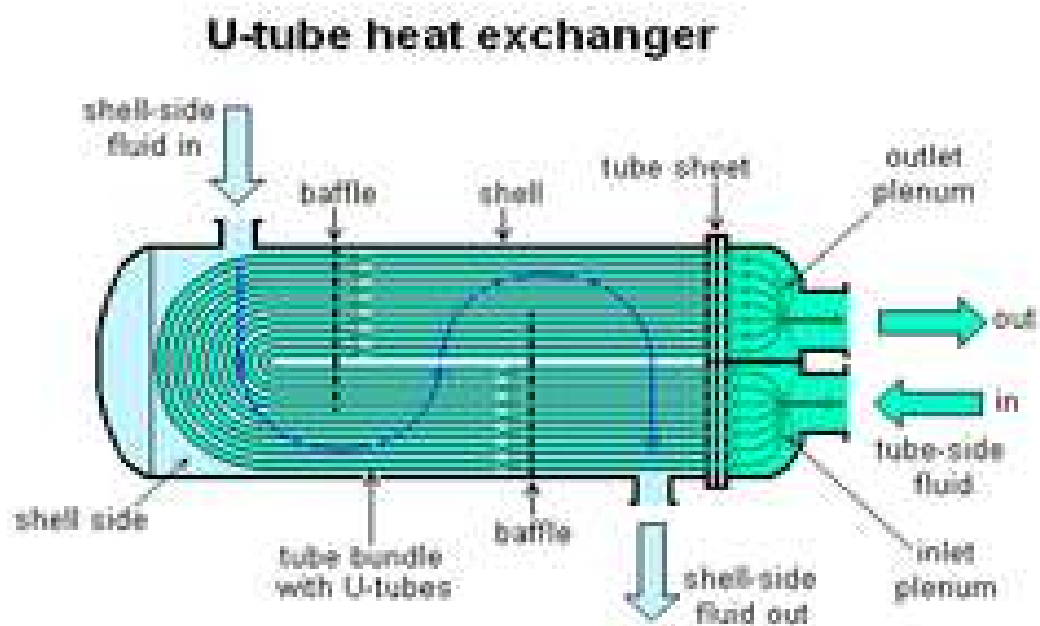


Figure I 6. Schéma d'un échangeur à tubes en U [12]

Avantages

- Résiste aux fortes pressions
- Libre dilatation des tubes et du corps
- Toutes puissances

Inconvénients

- Encombrement
- Prix de revient élevé
- Débouchage difficile

Utilisation

- Eau/eau
- Eau surchauffée/eau
- Huile/eau
- Process

I.5.2. Echangeur à faisceau tubulaire horizontal

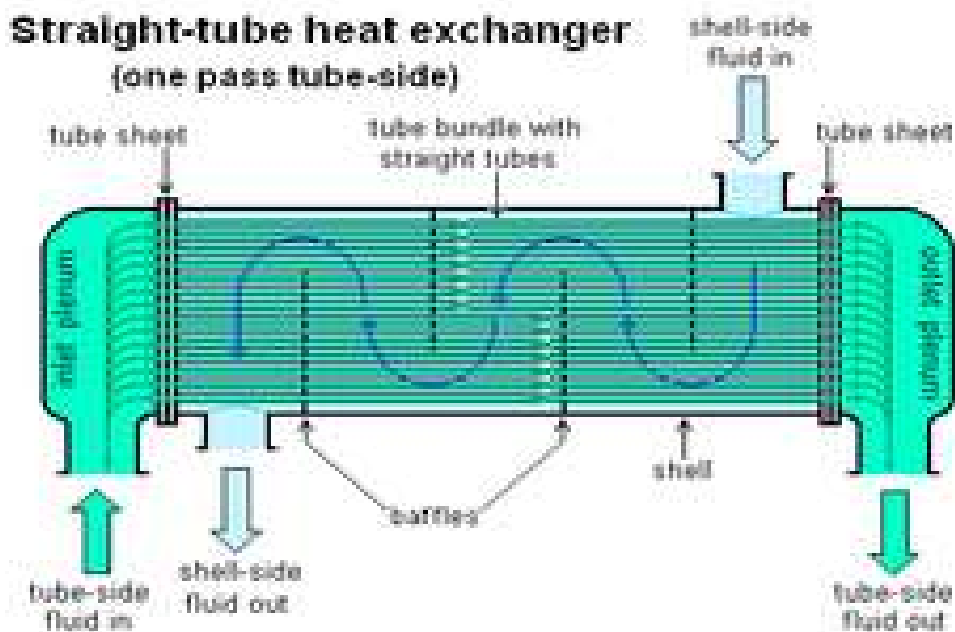


Figure I 7. Schéma d'un échangeur tubulaire [13]

Un schéma typique d'un échangeur tubes calandre (Shell and tubes échangeur ou échangeur à tubes et virole) est présenté ci-contre.

L'appareil est constitué d'un faisceau de tubes, disposés à l'intérieur d'une enveloppe dénommée calandre.

L'un des fluides circule à l'intérieur des tubes et l'autre à l'intérieur de la calandre, autour des tubes. On ajoute en général des chicanes dans la calandre, qui jouent le rôle de promoteurs de turbulence et améliorent le transfert à l'extérieur des tubes.

À chaque extrémité du faisceau sont fixées des boîtes de distribution qui assurent la circulation du fluide à l'intérieur du faisceau en une ou plusieurs passes.

La calandre est elle aussi munie de tubulures d'entrée et de sortie pour le second fluide (qui circule à l'extérieur des tubes) suivant le chemin imposé par les chicanes (voir figure).

Avantages

- Résiste aux fortes pressions.
- Pour toutes les puissances.
- Economique.
- Accepte des grands écarts de température.
- Peut être utilisé en condensation partielle.

Inconvénients

- Contraintes sur les tubes.
- Difficulté de nettoyage (multitubes).
- Sensible aux vibrations.

Utilisation

- Eau/eau.
- Vapeur/eau.
- Huile/eau.
- Eau surchauffée/eau.

I.5.3 Echangeur à faisceau tubulaire vertical

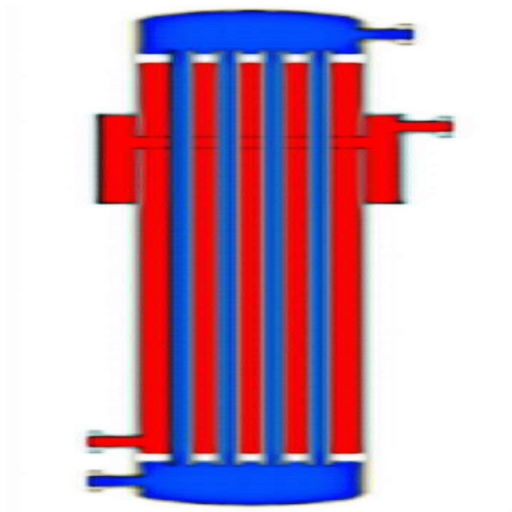


Figure I 8: Schéma d'un échangeur tubulaire [14]

Avantages

- Faible encombrement au sol.
- L'échangeur peut être plein de condensat.
- Parfaitement adapté à l'échange vapeur haute pression/eau.

Inconvénients

- Formation de poche d'air.
- Si le volume est supérieur à 100 L, soumis au contrôle des appareils sous pression (CH).

Utilisation

- Vapeur HP/eau.
- Eau surchauffée/eau.
- Fluide thermique/eau.
- Fumées/eau.
- Process.

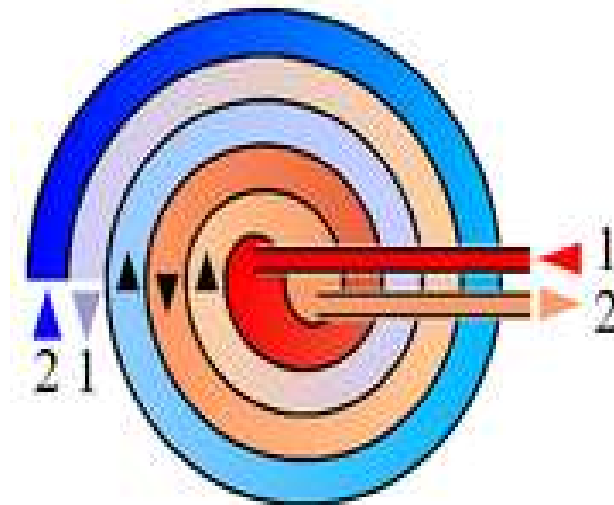
I.5.4. Echangeur à spirales :

Figure I 9. Schéma d'un échangeur à spirale [15]

Un échangeur à spirales consiste en 2 plaques de métal enroulées de manière hélicoïdale pour former une paire de canaux en spirale.

Le diamètre de l'échangeur est relativement grand, avec une surface d'échange Maximale d'environ 185 m^2 pour un diamètre de 1,5 m, ce qui le place dans la catégorie des échangeurs non-compacts.

L'échange de chaleur n'est pas aussi bon que celui de l'échangeur à plaques, car la surface d'échange ne possède pas en règle générale de profil, mais pour une même capacité d'échange, un échangeur spiral nécessite 20% de moins de surface d'échange qu'un échangeur à faisceau tubulaire.

Il est utilisable pour les liquides visqueux ou pour les mélanges liquide-solide et possède une capacité auto-nettoyant garantissant un encrassement réduit par rapport à l'échangeur à faisceau tubulaire.

Il ne peut travailler qu'avec des différences de températures et de pression limitées.

Avantages

- Grande surface de contact.
- Large passage.
- Encombrement réduit.
- Excellent condenseur.
- Autonettoyant.

Inconvénients

- Non démontable.
- Ecart de T limités.

Utilisation

- Eau/eau.
- Vapeur/eau.
- Eau surchauffée/eau.

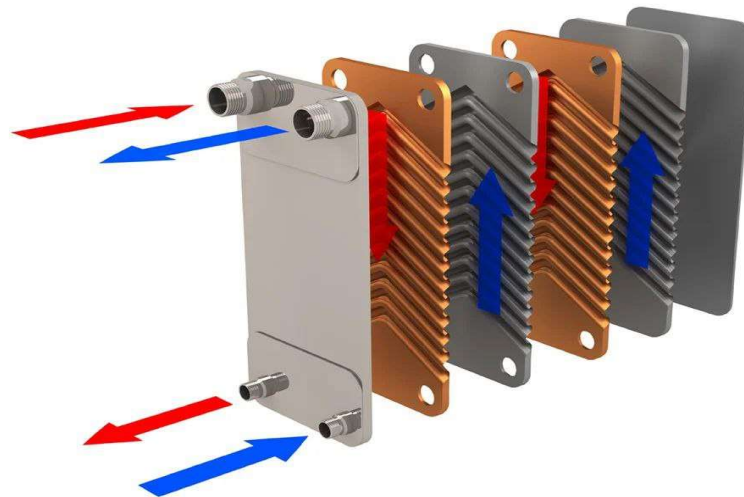
I.5.5. Echangeur à plaques

Figure I.16. Schéma d'un échangeur plaques [16]

L'échangeur à plaques est un type d'échangeur de chaleur qui connaît un usage croissant dans l'industrie.

Il est composé d'un grand nombre de plaques disposées en forme de millefeuilles et séparées les unes des autres d'un petit espace (quelques millimètres) où circulent les fluides.

Le périmètre des plaques est bordé d'un joint qui permet par compression de la structure d'éviter les fuites.

Les plaques ne sont pas plates, mais possèdent une surface ondulée selon un schéma bien précis afin de créer un flux turbulent synonyme d'un meilleur transfert de chaleur, mais permet également de canaliser les fluides se déplaçant à la surface vers les coins de la plaque.

Le fluide se déplace, par exemple, du coin inférieur gauche vers le coin supérieur droit de la plaque, où un orifice lié à un tuyau lui permet de passer de l'autre côté de la plaque et de sauter une couche du millefeuille (un espace entre 2 plaques) avant de s'écouler à nouveau le long de la plaque suivante.

Ainsi chaque fluide ne circule parallèlement à une plaque que tous les 2 espaces. Les avantages de ce type d'échangeur est sa simplicité qui est fait un échangeur peu coûteux et facilement adaptable par ajout/retrait de plaques afin d'augmenter/réduire la surface d'échange en fonction des besoins (Attention : la surface ne peut être augmentée de manière infinie à cause de la perte de charge).

La surface avec l'extérieur est réduite au minimum, ce qui permet de limiter les pertes thermiques et l'étroitesse de l'espace où circulent les fluides ainsi que le profil des plaques assurent un flux turbulent qui permet un excellent transfert de chaleur.

Toutefois ces derniers paramètres entraînent une importante perte de charge qui limite le nombre de passage des fluides entre les plaques. Cette perte de charge ne peut être compensée par une pression d'entrée des fluides élevée (<2.5 MPa) car une trop grande pression causerait des fuites au travers des joints placés entre les plaques.

La différence de températures entre les 2 fluides ne doit pas être trop grande également pour éviter une déformation des plaques par dilatation/contraction de ces dernières qui empêcherait les joints entre les plaques d'être parfaitement étanches.

La turbulence permet de réduire l'encrassement de la surface d'échange de 10-25% par rapport à un échangeur à faisceau tubulaire.

Comparativement à un échangeur à faisceau tubulaire la surface d'échange est inférieure de 50% pour le même transfert de chaleur.

Avantages

- Compact
- Très bons coefficients de transfert
- Prix compétitifs
- Peu de pertes thermiques
- Modulable

Inconvénients

- Faible écart de T possible
- Régulation
- Perte de charge importante
- Pression de travail limitée

Utilisation

- Vapeur BP/eau
- Eau/eau
- Huile/eau
- Eau surchauffée/eau

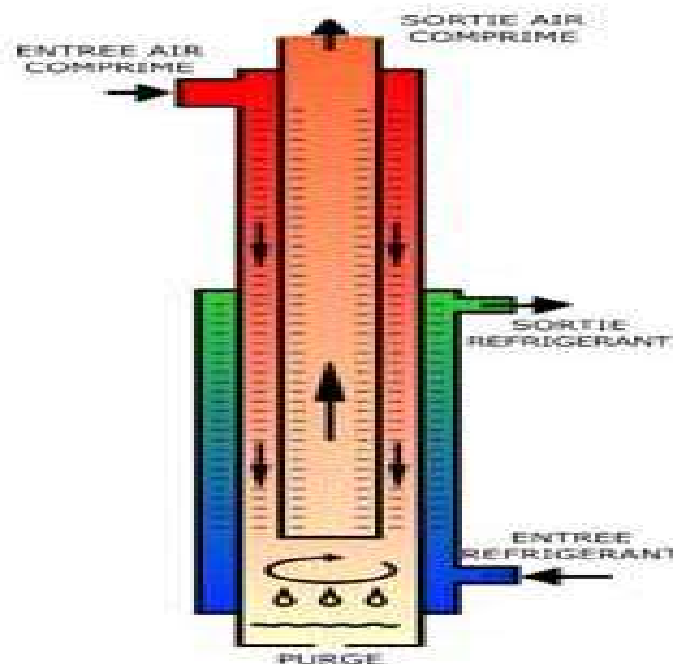
I.5.6. Colonne de Bouhy

Figure I 17. Colonne de Bouhy [17]

Excellente alternative aux échangeurs à plaques dans les sécheurs d'air comprimé, la colonne de Bouhy est en fait un échangeur à tête d'épingle auquel a été ajouté un séparateur air/eau centrifuge dans la partie inférieure.

Le dispositif dispose de deux échangeurs coaxiaux, le premier servant à amener l'air en dessous de son point de rosée, le second servant à la fois à ramener l'air à une température convenant à son utilisation et surtout à augmenter l'efficacité du refroidissement.

Ce type d'échangeur se caractérise par une très faible perte en charge.

I.5.7. Echangeur à bloc



Figure I 18. Schéma d'un échangeur à bloc complexe [18]



Figure I 19. Schéma d'un échangeur à bloc simple [19]

L'échangeur à bloc est un type d'échangeur de chaleur réservé à des applications particulières.

Il consiste en un bloc d'une matière thermiquement conductrice percé de multiples canaux dans lesquels circulent les 2 fluides. Le bloc est le plus souvent composé de graphite additionné parfois de polymères pour améliorer les propriétés mécaniques de l'échangeur. Le bloc est placé dans une structure qui assure la distribution des liquides dans les canaux. Le bloc peut avoir différentes formes : cylindrique ou cubique.

Il peut encore être composé d'un seul bloc ou de plusieurs parties empilées de manière à permettre les fluides de passer d'une partie à l'autre.

L'intérêt de ce type d'échangeur de chaleur est principalement sa résistance chimique aux liquides corrosifs ainsi que sa capacité modulaire : le bloc peut facilement être remplacé en cas de fuites.

Le fait que le rapport volume libre pour passage des fluides/volume du bloc est très petit crée une grande inertie dans les cas de changements de température : le bloc agit comme un réservoir et peut lisser les différences de température.

Les blocs sont cependant fragiles tant aux chocs qu'aux grands écarts de température (problème de dilatation non-uniforme pouvant conduire à des fissurations du bloc).

Le prix est relativement élevé par rapport aux autres types d'échangeurs et le transfert de chaleur est en général moyen : l'épaisseur de la paroi d'échange est plus grande que pour une surface d'échange en métal pour cause de fragilité, ce qui augmente la résistance au transfert.

Avantages

- Bonne résistance chimique
- Inertie
- Peu de pertes thermiques
- Modulable

Inconvénients

- Sensible aux grands écarts de T
- Sensible aux chocs
- Coefficients de transfert moyen
- Prix

Utilisation

- Vapeur/eau
- Eau/eau
- Eau surchauffée/eau
- Liquides corrosifs

I.5.8. Echangeur à ailettes



Figure I 20. Échangeur eau/air d'automobile [20]

Un échangeur à ailettes est un échangeur relativement simple : il consiste en un conduit cylindrique ou rectangulaire sur lequel sont fixées des lames métalliques de différentes formes.

Le fluide de refroidissement est en général l'air ambiant. La chaleur est transférée du fluide chaud circulant dans le conduit principal aux lames métalliques par conduction thermique ; ces lames se refroidissent au contact de l'air.

Ce type d'échangeur est utilisé pour le chauffage dans les bâtiments : de l'eau est chauffée dans l'installation de chauffage et circule dans des radiateurs qui sont des échangeurs à ailettes.

On utilise également ce type d'installation pour refroidir les moteurs de voiture ou encore les moteurs en tout genre. Dans ce dernier cas, la chaleur due aux frottements et à l'induction magnétique (cas d'un moteur électrique) est directement transférée à la protection extérieure du moteur qui possède des ailettes fixées à sa surface.

Le transfert thermique est limité notamment du côté du fluide de refroidissement par manque d'un système de circulation : l'air circule principalement par convection naturelle autour de l'échangeur.

Cette limitation peut toutefois être supprimée par ajout d'un système de ventilation.

Cet échangeur est très simple et peut prendre des formes particulières, ce qui le rend intéressant dans l'électronique.

Avantages

- Bon rendement.
- Peut prendre des formes précises.

Inconvénients

- Craint les chocs.

Utilisation

- Eau/air.
- Huile/air.
- Solide/air.

Chapitre 2 :

NOTIONS SUR LES ECHANGEURS DE CHALEUR

II.1 Généralités

Un échangeur de chaleur est un appareil destiné à transférer la chaleur d'un fluide chaud à un autre fluide froid sans qu'il y ait mélange.

Il existe plusieurs types d'échangeurs et ils existent de toutes puissances.

Il faut noter que dans certains appareils, l'échange de chaleur est associé à un changement de phase de l'un des fluides, comme c'est le cas des condenseurs, évaporateurs, bouilleurs, tours de refroidissement, ...

Dans ce chapitre, nous allons étudier principalement les échangeurs à fluides séparés et sans changement de phase et à en indiquer le principe de calcul du point d'une thermique en application des méthodes concernant la détermination toujours délicate de h .

II.2 Classification des échangeurs selon le sens relatif d'écoulement des 2 fluides

On distingue

- Les échangeurs à circulation méthodique ou à contre-courant : les deux fluides circulent parallèlement et en sens contraires.
- Les échangeurs à circulation anti-méthodique ou à courants parallèles : les deux fluides circulent parallèlement et dans le même sens.
- Les échangeurs à courant croisés.

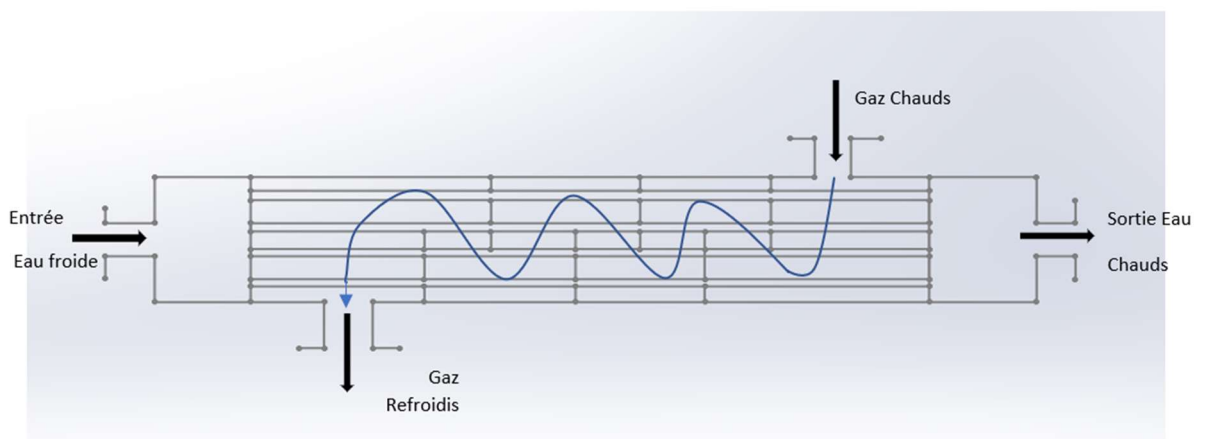


Figure II 1. Echangeur à circulation méthodique pour refroidissement de gaz chauds.

II.3 Distribution des températures dans un échangeur

Nous donnons ci-après les allures des diagrammes de distribution longitudinale des températures d'un échangeur d'un seul passage (type double-tube), sans changement de phase.

Les notations utilisées seront les suivantes :

- Surface d'échange global S .
- Surface d'échange élémentaire ds .
- T_{ce} Température entrée fluide chaud.
- T_{cs} Température sortie fluide chaud.
- T_{fe} Température entrée fluide froid.
- T_{fs} Température sortie fluide froid.

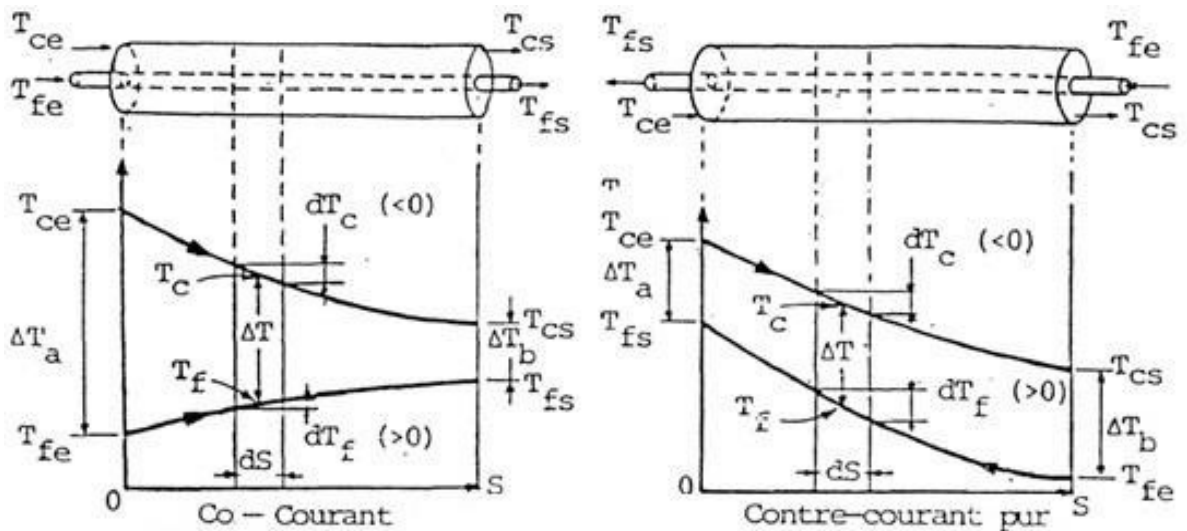


Figure II.2. Courants parallèles avec contre-courant [21]

II.4 Evaluation des performances thermiques d'un échangeur en régime permanent

II.4.1 Expression du flux élémentaire, $d\phi$ échangé entre les deux fluides à travers un élément dS de la surface d'échange

$$d\phi = K \cdot dS \cdot (T_c - T_f) \quad (\text{II-1})$$

T_c Et T_f Sont les températures des deux fluides à l'endroit de l'élément dS de la surface d'échange (fig-2-) ; elle sont fonction de l'abscisse dS .

K est le coefficient d'échange global entre les deux fluides, au niveau de l'élément dS , exprimé en $W/(m^2 \cdot K)$; il comprend principalement les deux coefficients d'échange fluide -paroi (convection) et un terme de conduction à travers la paroi solide.

II.4.2 Méthodes de calcul thermique d'un échangeur

Deux méthodes de calcul sont utilisées :

- Celle de la différence de température moyenne logarithmique. (Méthode ΔT_{LM}).
- Ou celle du nombre d'unités de transfert (méthode NUT).

II.4.3 Méthode ΔT_{LM}

Considérons le cas d'un échangeur à contre-courants (fig.2.b).

Les flux de chaleur $d\phi$ transmis du fluide chaud au fluide froid à travers l'élément de surface d'échange dS s'écrira :

$$d\phi = K \cdot dS \cdot (T_c - T_f) = kdS\Delta T \quad (\text{II-2})$$

$$\text{Ou } d\phi = -\dot{m}_c c_{pc} dT_c \text{ (flux perdu pour le fluide chaud, } dT_c < 0 \text{)}. \quad (\text{II-3})$$

$$\text{Ou } d\phi = -\dot{m}_f c_{pf} dT_f \text{ (flux gagné par le fluide froid, } dT_f < 0 \text{)}. \quad (\text{II-4})$$

\dot{m}_c et \dot{m}_f sont respectivement les débits massiques du fluide chaud et du fluide froid (kg/s).

c_{pc} et c_{pf} sont les chaleurs massiques à pression constante des 2 fluides (J/Kg. °C).

$\dot{m}_c c_{pc}$ et $\dot{m}_f c_{pf}$ sont appelés débits calorifiques capacités thermiques.

$$dT_c = -\frac{d\phi}{\dot{m}_c c_{pc}} \quad (\text{II-5}) ; \quad dT_f = -\frac{d\phi}{\dot{m}_f c_{pf}} \quad (\text{II-6})$$

$$d(T_c - T_f) = dT_c - dT_f \equiv -d\phi \left(\frac{1}{\dot{m}_c c_{pc}} - \frac{1}{\dot{m}_f c_{pf}} \right). \quad (\text{II-7})$$

$$d(T_c - T_f) = -K \cdot dS \cdot (T_c - T_f) \left(\frac{1}{\dot{m}_c c_{pc}} - \frac{1}{\dot{m}_f c_{pf}} \right). \quad (\text{II-8})$$

En divisant les 2 membres de cette déviée expression par $(T_c - T_f)$, on obtient

$$\frac{d(T_c - T_f)}{(T_c - T_f)} = -K \cdot dS \left(\frac{1}{\dot{m}_c c_{pc}} - \frac{1}{\dot{m}_f c_{pf}} \right). \quad (\text{II-9})$$

Supposons k constant tout le long de l'échangeur, et intégrons cette dernière équation en introduisant les conditions aux extrémités, on obtient

$$\text{Ln} \left(\frac{T_{c_s} - T_{f_e}}{T_{c_e} - T_{f_s}} \right) = -KS \left(\frac{1}{\dot{m}_c c_{pc}} - \frac{1}{\dot{m}_f c_{pf}} \right). \quad (\text{II-10})$$

Le bilan enthalpique global de l'échangeur de chaleur entre 2 fluides nous donne :

$$\phi = \dot{m}_c c_{pc} (T_{c_e} - T_{c_s}) = -\dot{m}_f c_{pf} (T_{f_s} - T_{f_e}). \quad (\text{II-11})$$

ϕ Flux total échangé dans tout l'échangeur.

De cette équation, on tire $\dot{m}_c c_{pc}$ et $\dot{m}_f c_{pf}$ en fonction de ϕ et on les remplace dans l'équation (4-1).

On obtient :

$$\dot{m}_c c_{pc} = \frac{\phi}{T_{c_e} - T_{c_s}} \quad (\text{II-12}) \quad \text{Et} \quad \dot{m}_f c_{pf} = \frac{\phi}{T_{f_s} - T_{f_e}} \quad (\text{II-13})$$

$$\text{Ln} \left(\frac{T_{c_s} - T_{f_e}}{T_{c_e} - T_{f_s}} \right) = -\frac{KS}{\phi} [(T_{c_e} - T_{c_s}) - (T_{f_s} - T_{f_e})] \quad (\text{II-14})$$

D'où on tire ϕ

$$\phi = KS \frac{(T_{c_e} - T_{f_s}) - (T_{c_s} - T_{f_e})}{\text{Ln} \left(\frac{T_{c_e} - T_{f_s}}{T_{c_s} - T_{f_e}} \right)} \quad (\text{II-15})$$

$$\text{Posons} \quad \phi = KS \Delta T_{LM} \quad (\text{II-16})$$

Et notons par les différences entre les températures des fluides chaud et froid aux extrémités de l'échangeur, on obtient.

$$\Delta T_{LM} = \frac{\Delta T_a - \Delta T_b}{\text{Ln} \left(\frac{\Delta T_a}{\Delta T_b} \right)} \quad (\text{Figure II.2 et Figure II.3}). \quad (\text{II-17})$$

ΔT_{LM} Est la moyenne logarithmique de température globale entre les deux fluides.

Remarque :

Les formules (II-16) et (II-17) établies dans le cas d'un échangeur à contre-courant restent valables dans le cas de l'échangeur à courant parallèles.

II.5 Le coefficient d'échange global (k)

Le transfert de chaleur du fluide chaud au fluide froid peut être décomposé comme suit :

- Convection fluide chaud-paroi (coefficient de convection h_c).
- Conduction à travers la paroi (conductivité λ).
- Convection paroi-fluide froid (coefficient de convection h_f).

Le coefficient d'échange global fluide chaud-fluide froid s'écrit :

II.5.1 Cas d'une paroi plane ou à grand rayon de courbure

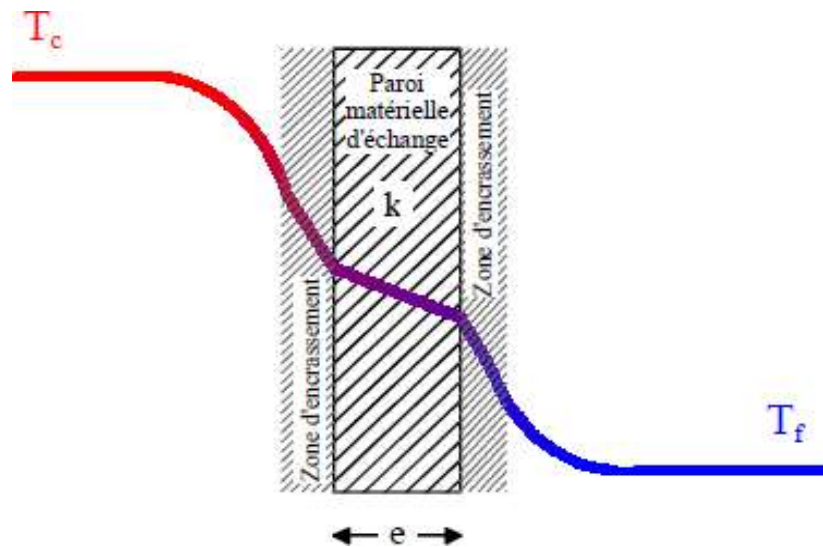


Figure II 3. Schéma du transfert thermique à travers une paroi plane d'un échangeur

[21]

$$\phi = \frac{T_c - T_f}{\frac{1}{h_c S} + \frac{e}{\lambda S} + \frac{1}{h_f S}} = k S (T_c - T_f) \quad (\text{II-18})$$

$$K = \frac{1}{\frac{1}{h_c} + \frac{e}{\lambda} + \frac{1}{h_f}} \quad \text{ou} \quad \frac{1}{k} = \frac{1}{h_c} + \frac{e}{\lambda} + \frac{1}{h_f} \quad (\text{II-19})$$

[29]

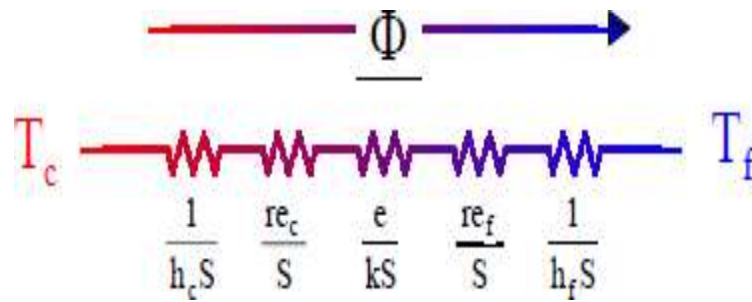


Figure II 4. Schéma analogique [21]

II.5.2 Cas de parois tubulaires

Il y a lieu de préciser à quelle face interne ou externe rapporter la convection d'échange global.

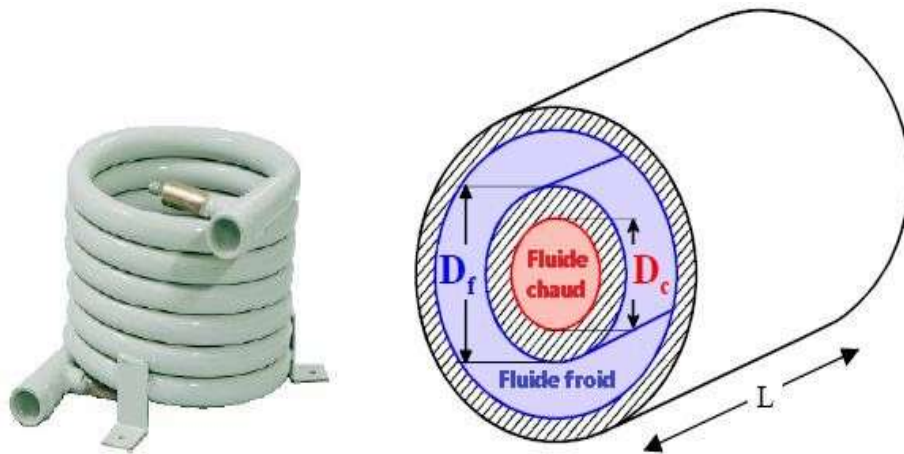


Figure II 5. Echangeur à tube coaxial (schéma d'une coupe de tube à droite) [21]

Transfer 1-2

$$\frac{1}{k_1} = \frac{1}{h_1} + \frac{r_1}{\lambda} \ln \frac{r_2}{r_1} + \frac{r_1}{r_2 h_2} + (Re) \quad \text{Pour fluide (1)} \quad (\text{II-20})$$

Re: Résistance à l'encrassement.

Transfer 2-2

$$\frac{1}{k_2} = \frac{1}{h_2} + \frac{r_2}{\lambda} \ln \frac{r_2}{r_1} + \frac{r_2}{r_1 h_1} + (Re) \quad \text{Pour fluide (2)} \quad (\text{II-21})$$

Aux trois résistances individuelles Suet s'ajouter une résistance thermique due à l'encrassement Re ; sa valeur dépendre du fluide véhiculé et du vieillissement du tube.
-coefficient d'échange global par unité de longueur.

$$\phi = K_L L (T_1 - T_2) \quad (\text{II-22})$$

$(T_1 - T_2) \neq De T^0$ entre les (02) $[\Delta T_{LM}]$.

II.5.3 Cas de surface ailettes

Pour tenir compte ailettes, introduit Des confessions d'efficacité de surface ailettes compris entre 0 et 1 qui multiplient le coefficient de convection correspondant.

II.6 Méthode "NUT"

II.6.1 Efficacité d'un échangeur (E)

$$E = \frac{\phi_{reél}}{\phi_{Max}} \quad (\text{II-23})$$

$\phi_{reél}$: flux thermique (au puissance thermique) réellement échangé dans l'échangeur.

ϕ_{Max} : flux thermique maximum échangeable Théoriquement avec les mêmes conditions d'entrée des fluides dans l'échangeur.

La puissance maximum d'échange (ϕ_{Max}) est obtenue lorsque l'un des fluides subit une variation de température égale à la différence entre les températures d'entrée des fluides chaud et froid.

La comparaison des évaluations des températures dans les deux modèles de base des échangeurs (à courants parallèles et à contre-courant) montre que la puissance maximum d'échange serait obtenue avec un échangeur idéal contre-courant par, infiniment long et sans pertes, elle vaudrait.

$$\phi_{Max} = (\dot{m}_{c_p})_{min} (T_{c_e} - T_{f_e}) \quad (\text{II-24})$$

$$(\dot{m}_{c_p})_{m_{in}} = \text{Minimum} [\dot{m}_c c_{pc}, \dot{m}_f c_{pf}]$$

Où L'efficacité

$$E = \frac{\dot{m}_c c_{pc} (T_{c_e} - T_{c_s})}{(\dot{m}_{c_p})_{m_{in}} (T_{c_e} - T_{f_e})} = \frac{\dot{m}_f c_{pf} (T_{f_s} - T_{f_e})}{(\dot{m}_{c_p})_{m_{in}} (T_{c_e} - T_{f_e})} \quad (\text{II-25})$$

Ou peut écrire

$$E = \frac{T_{c_e} - T_{c_s}}{T_{c_e} - T_{f_e}} \quad (\text{II-26}) \quad \text{Si} \quad (\dot{m}_{c_p})_{m_{in}} = \dot{m}_c c_{pc} \quad (\text{II-27})$$

Où

$$E = \frac{T_{f_s} - T_{f_e}}{T_{c_e} - T_{f_e}} \quad (\text{II-28}) \quad \text{Si} \quad (\dot{m}_{c_p})_{m_{in}} = \dot{m}_f c_{pf} \quad (\text{II-29})$$

II.6.2 Expression du flux réel échangé

$$\phi = E (\dot{m}_{c_p})_{m_{in}} (T_{c_e} - T_{f_e}) \quad (\text{II-30})$$

Posons $(\dot{m}_{c_p})_{m_{in}} = C_{m_{in}} \quad (\text{II-31})$

$C_{m_{in}}$: Capacité thermique minimale.

On aura $\phi = E C_{m_{in}} (T_{c_e} - T_{f_e}) \quad (\text{II-32})$

La puissance échangée sera donc connue si on a

- E
- Les températures d'entrée des fluides.

II.6.3 Expressions de E pour quelques configurations d'écoulement

II.6.3.1 Echangeur à courant parallèles

$$E = \frac{1 - \exp\left[-\left(1 + \frac{c_{min}}{c_{Max}}\right) \frac{kS}{c_{min}}\right]}{1 + \frac{c_{min}}{c_{Max}}} \quad (\text{II-33})$$

Avec

$$c_{min} = \text{Minimum} [\dot{m}_c c_{pc}, \dot{m}_f c_{pf}]$$

$$c_{Max} = \text{Maximum} [\dot{m}_c c_{pc}, \dot{m}_f c_{pf}]$$

II.6.3.2 Echangeur à contre -courant pur

$$E = \frac{1 - \exp\left[-\left(1 - \frac{c_{min}}{c_{Max}}\right) \frac{kS}{c_{min}}\right]}{1 - \frac{c_{min}}{c_{Max}} \exp\left[-\left(1 - \frac{c_{min}}{c_{Max}}\right) \frac{kS}{c_{min}}\right]} \quad (\text{II-34})$$

Aines d'une manière générale, l'efficacité peut être représentée peu une fonction du type.

$$E = f\left(\frac{kS}{c_{min}}, \frac{c_{min}}{c_{Max}}, \text{configuration d'écoulement}\right).$$

Les groupements sous dimension $\frac{kS}{c_{min}}$ est appelé nombre d'unités de transfert (NUT).

Des abaques fournissent l'efficacité (E) à partir de NUT et du rapport $\frac{c_{min}}{c_{Max}}$ existent pour

la plupart des configurations d'écoulement courantes (se référer à l'ouvrage de (KAYS ET LONDON : compact heat exchangers).

II.6.4 marches à suivre pour le calcul d'un échangeur par la méthode NUT :

1- détermination de confession d'échange global K (NU)

2-détermination des capacités thermiques $\dot{m}_c c_{pc}$, $\dot{m}_f c_{pf}$; calcul de $\frac{c_{min}}{c_{Max}}$.

3-détermination de NUT $= \frac{kS}{c_{min}}$.

4-détermination de l'efficacité E à partir d'abaques (E=f).

5-calcul de la puissance thermique échangée ϕ :

$$\phi = EC_{min} (T_{ce} - T_{fe}) \quad (\text{II-35})$$

Il faut noter que seules les températures d'entrée des fluides interviennent dans ce type de calcul.

II.7 Comparaison des méthode ΔT_{LM} et NUT

Pour le calcul d'un échangeur, on a le choix d'appliquer l'une des deux méthodes qui donnent le même résultat ; Toutefois dans certains cas, la méthode NUT serait plus judicieuse car :

- les températures de sortie des fluides n'ont pas besoin d'être données.
- simplicité d'emploi.

Comparons les deux méthodes dans les deux cas suivants :

1^{er} Cas :

Données : $k, \dot{m}_c c_{pc}, \dot{m}_f c_{pf}, T_{ce}, T_{cs}, T_{fe}, T_{fs}$.

Problème : détermination de la surface d'échange nécessaire pour ce type de problèmes, les deux méthodes sont équivalentes.

2^{eme} Cas :

Données : $S, k, \dot{m}_c c_{pc}, \dot{m}_f c_{pf}, T_{ce}$ et T_{fe} .

Problème :

- Détermination des températures de sortie du fluide : T_{cs} et T_{fs} .
- Détermination de la puissance échangée.

Pour ce type de problèmes (cas), la méthode NUT est plus commandée à appliquer.

Chapitre 3 :

**RESULTATS ET
DISCUS**

III.1. Introduction

L'augmentation rapide de la puissance des calculateurs a rendu possible le développement des codes commerciaux traitant les problèmes de transport des fluides. Ces codes permettent la résolution des équations de NUT, DTLM, à l'aide de méthodes tel que les volumes finis, les éléments finis, les différences finis, dans un domaine physique 2D ou 3D de géométrie quelconque.

Dans notre étude, la simulation est réalisée à l'aide du logiciel de CFD, SolidWorks 2016, pour résoudre les équations hydrodynamiques de conservation de la quantité de mouvement et de la masse, celle de l'énergie, sont résolues par la méthode des volumes finis dans l'écoulement laminaire au sein d'un échangeur à tubes et calandre. Cette étude a un caractère numérique. On va exposer dans ce chapitre les résultats sous forme de contour et vecteur ainsi que des graphes.

III.2. Présentation du logiciel SolidWorks

Le logiciel SOLIDWORKS est un modéleur volumique permettant de créer des pièces complexes en 3 dimensions. Ces pièces peuvent être ensuite utilisées pour créer des mises en plan en 2D et des assemblages de plusieurs pièces entre elles.

SOLIDWORKS est un système à cotation piloté. On peut spécifier des côtes et rapports géométriques entre les éléments. Un changement de cote entraîne un changement de taille de la pièce, tout en préservant l'intention de conception.

Un modèle SolidWorks est constitué de pièces, d'assemblages et de mise en plan. Les pièces, les assemblages et les mises en plan affichent le même modèle dans des documents différents. Les changements opérés sur le modèle dans l'un des documents se propagent aux autres documents contenant ce modèle.

III.2.1. SOLIDWORKS Simulation

SOLIDWORKS Simulation est un portefeuille d'outils d'analyse structurelle faciles à utiliser qui font appel à la méthode d'analyse par éléments finis (FEA) pour prédire le comportement physique réel d'un produit en testant virtuellement des modèles de CAO. Le portefeuille propose des fonctionnalités d'analyse dynamique et statique non linéaire et linéaire. SolidWorks Simulation permet de tester le comportement mécanique des pièces et des assemblages modélisés dans SolidWorks. SolidWorks Simulation

permet de faire une étude : Statique, Fréquentielle, Flambement, Thermique, Test de chute, Fatigue et Dynamique (Modale, harmonique, spectrale et aléatoire).

III.2.2. Ecoulement des fluides sur SolidWorks (SolidWorks Flow Simulation)

SolidWorks Flow Simulation est un logiciel d'analyse des écoulements de fluide et du transfert thermique entièrement intégré à SolidWorks. IL simule le test du prototype du modèle dans son environnement fluide de travail. SolidWorks Flow Simulation est utilisé par les étudiants, les concepteurs, les analystes, les ingénieurs et les autres professionnels pour produire des conceptions très efficaces et/ou optimiser leur performance.

III.2.3. Cycle de conception avec SolidWorks Flow Simulation

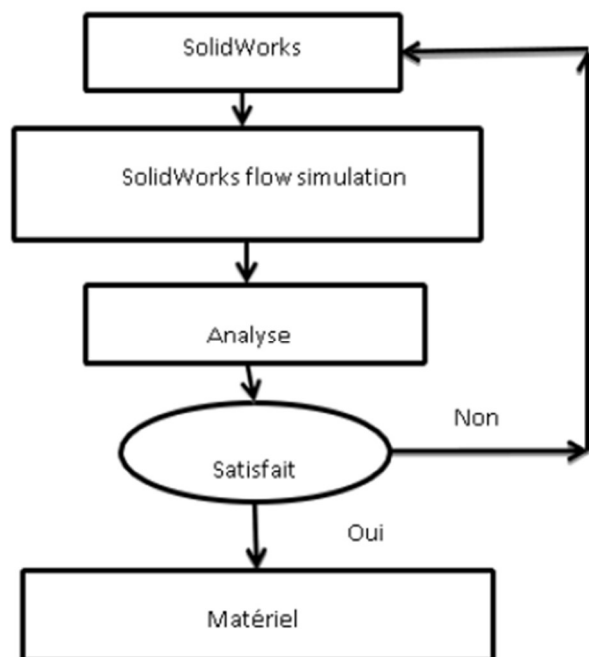


Figure. III. 1. Cycle de conception avec SolidWorks Flow Simulation.

III.2.4. Objectifs de l'analyse

- Détermination des chutes de pression, de la résistance hydraulique.
- Calcul des flux de chaleur, des coefficients de transfert thermique.
- Calcul des trajectoires de particules dans le champ d'écoulement et des paramètres d'interaction des particules avec le modèle.

III.2.5. Création de géométrie

Contrôle l'affichage des points, des courbes, des surfaces et des corps. Les sous-ensembles peuvent également être créés, affichés et modifiés. Un sous ensemble donné peut contenir un nombre quelconque de différents types de géométrie.

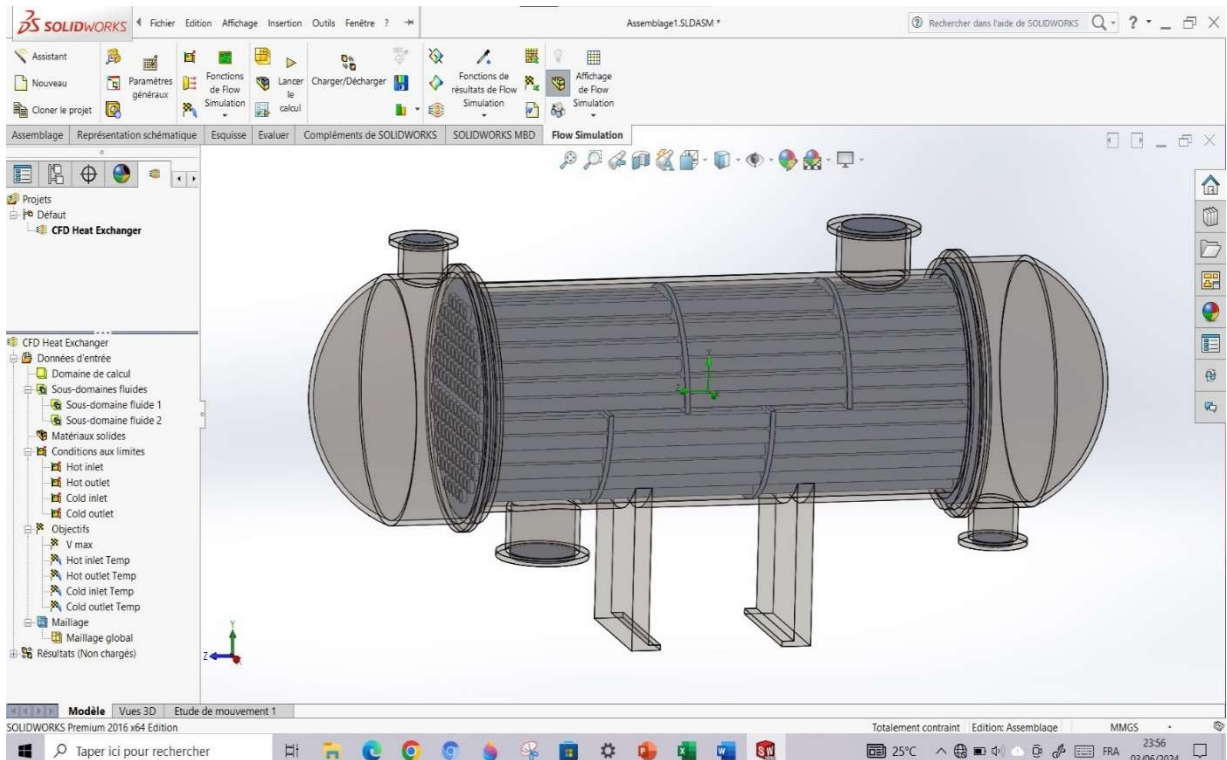


Figure. III. 2. Module de création de géométrie sur SolidWorks

III.2.6. Maillage

Le maillage fractionne le modèle et le volume fluide en un grand nombre de parties de petites dimensions (les cellules). Les petites cellules donnent des résultats plus précis mais exigent davantage de ressources informatiques. On doit remailler le modèle après toute modification de la géométrie. Les modifications des paramètres des conditions de matière et aux limites n'exigent pas de remaillage.

Le système de maillage automatique crée le maillage conformément à la taille de jeu minimale spécifiée, à l'épaisseur de paroi minimale, au niveau de résolution des résultats.

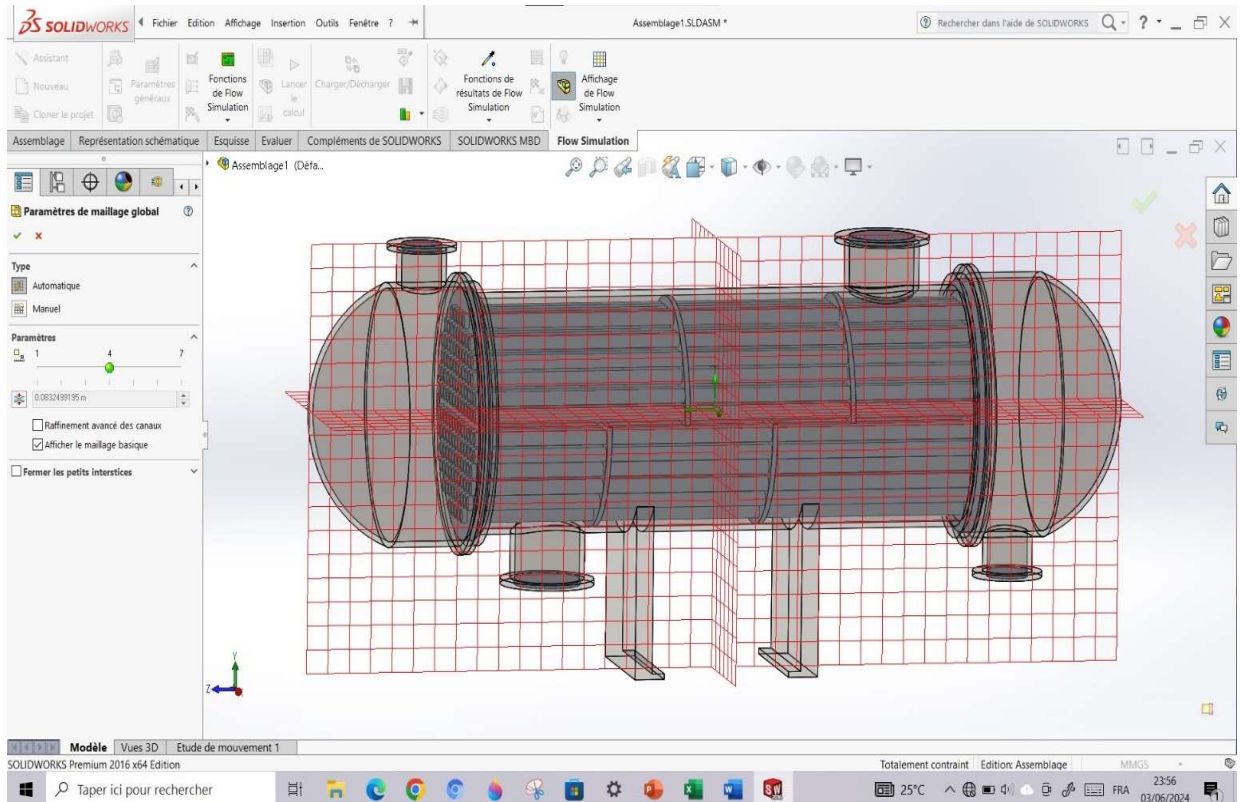


Figure. III. 3. Création de maillage sur SolidWorks

III.2.7. Visualisation des résultats

SolidWorks Flow Simulation propose des outils avancés, et faciles à utiliser, pour visualiser les résultats : coupe, profil 3D et tracés de surface (contours, iso lignes, vecteurs), iso-surfaces, tracés XY, trajectoires d'écoulement et de particules, animation des résultats.

Il propose des outils avancés pour le traitement des résultats : paramètres de point, de surface et de volume, tracés des objectifs, rapport au format MS Word.

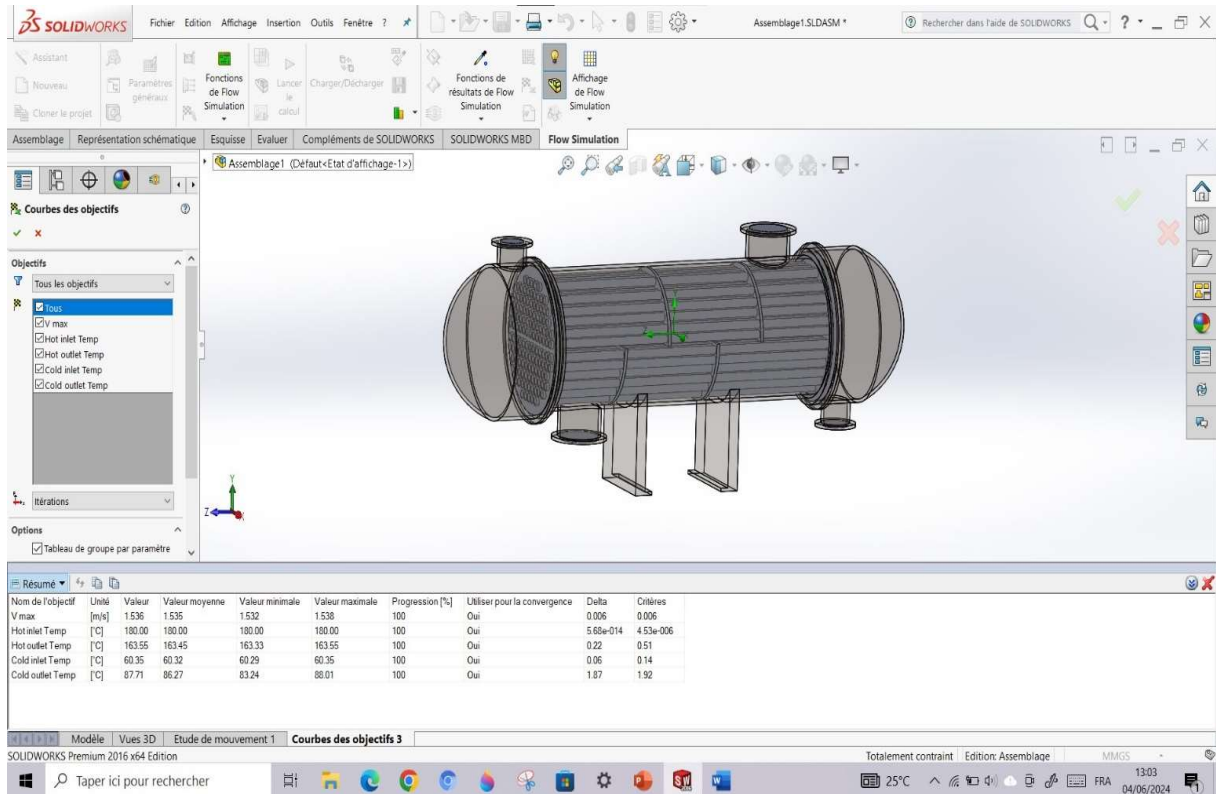


Figure. III. 4. Visualisation et représentation des résultats sur SolidWorks.

III.3. Formulation du problème

Cette étude porte sur l'analyse du transfert thermique entre deux fluides l'un chaud et l'autre froid s'écoulant en sens contre-courant à travers un échangeur de chaleur à tubes et calandre. La géométrie 3D, les spécifications et la taille de l'échangeur de chaleur sont répertoriées dans le tableau 1. Dans ce type d'échangeur de chaleur, l'eau chaude pénètre d'un côté (Intel hot) et l'eau froide (Intel cold) pénètre dans les tubes dans la direction opposée.

On cherche à optimiser un échangeur de chaleur qui maximise le gain énergétique en termes de

Flux de chaleur avec moins de perte de charge.

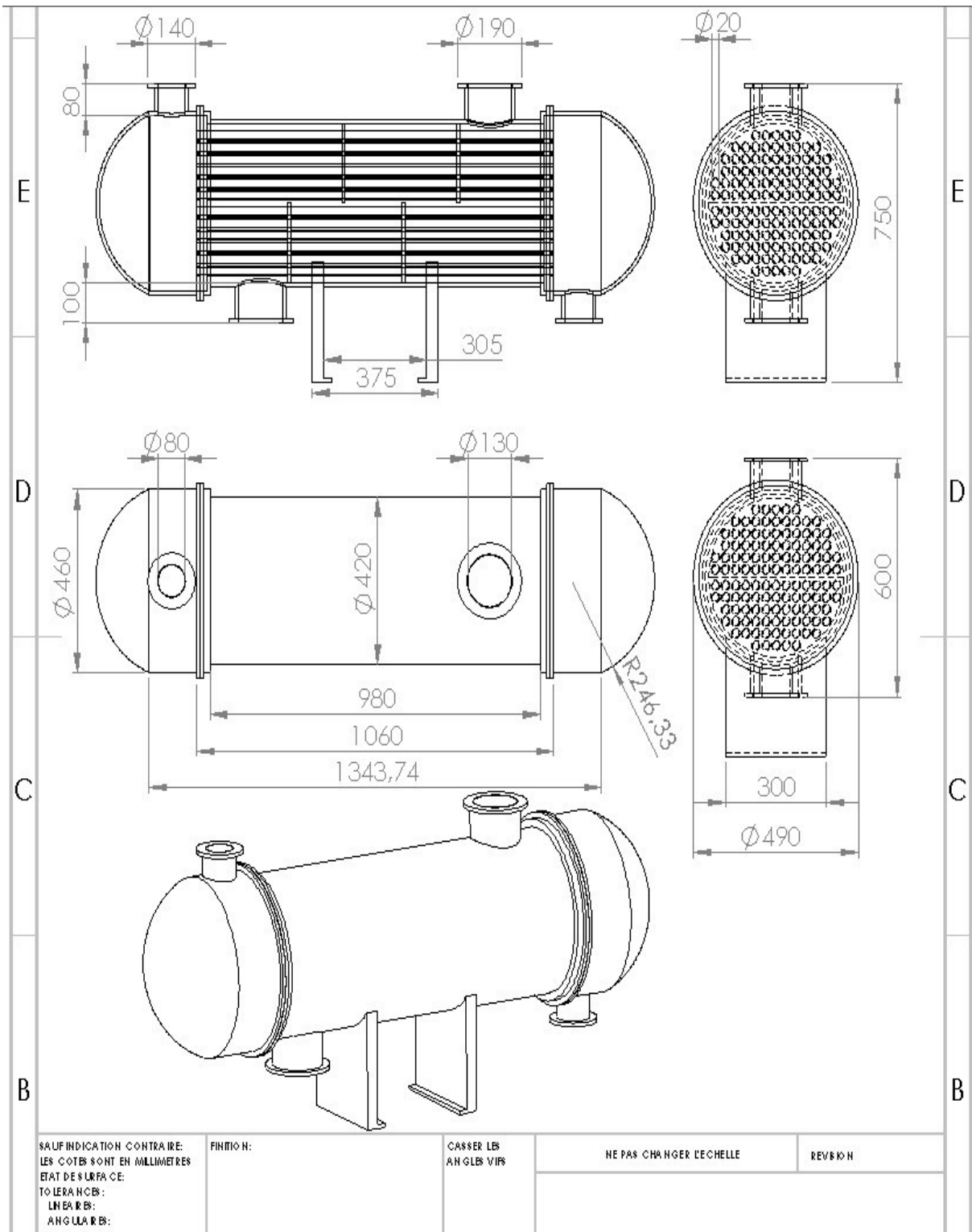


Figure. III. 5. Schéma détaillé de la géométrie de la calandre de l'échangeur de chaleur

Description		Valeur	
Longueur de la calandre (mm)		1060	
Diamètre de la calandre (mm)		420	
Diamètre de la plaque tubulaire (mm)		460	
Diamètre entrée/sortie de calandre		130	
Diamètre entrée/sortie de tubes		80	
Nombre de tube		124	
Diam (ext)	Diam (Int)	Diam (T)	Diam (e)
420	400	460	130
Lt (mm)		Lc (mm)	
1060		1060	

Table. III. 1. Dimensions de l'échangeur de chaleur.

III.3.1. Structure de l'écoulement dans un échangeur de chaleur à tube et calandre

Dans les échangeurs à tubes et calandre, l'un des fluides appelé fluide côté tubes circule à l'intérieur d'un ensemble de tubes parallèles appelé faisceau tubulaire.

Ces tubes sont enfermés dans une enveloppe appelée calandre.

L'autre fluide appelé fluide côté calandre circule à l'intérieur de la calandre mais à l'extérieur des tubes. Les tubes et la calandre sont donc soumis à la pression des fluides et doivent donc être construits pour y résister.

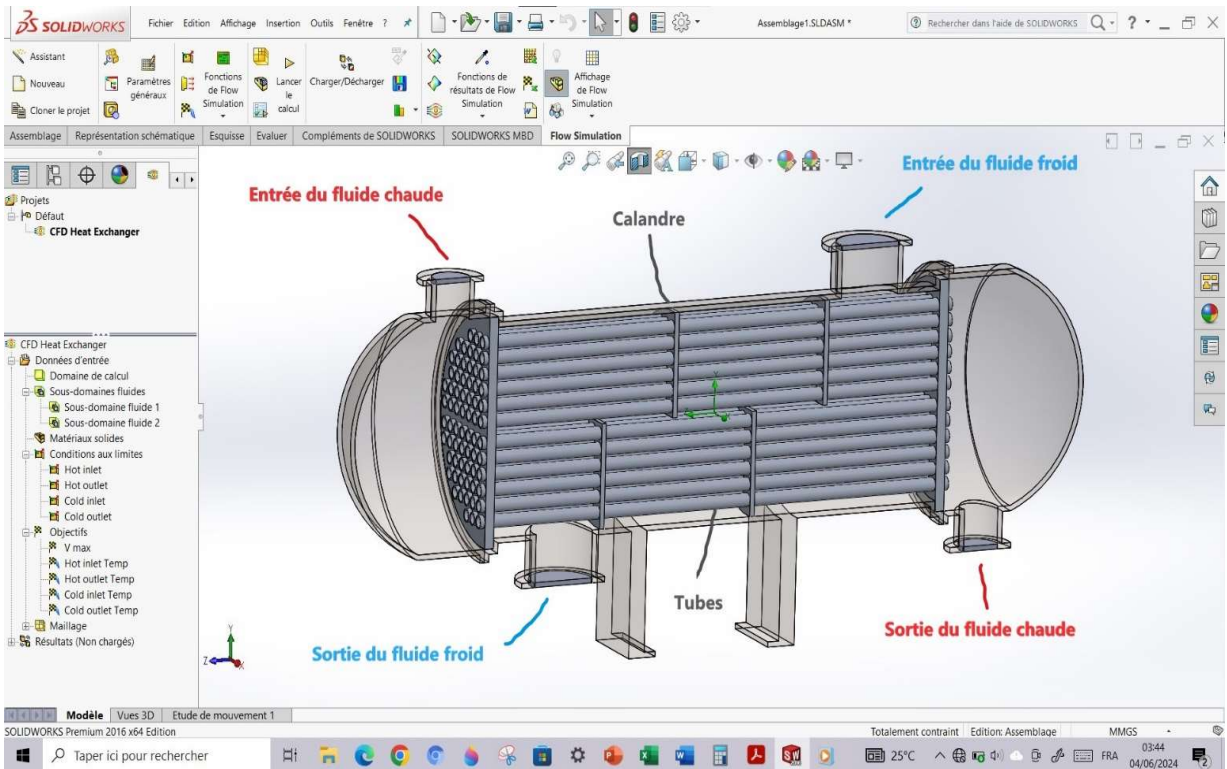


Figure. III. 6. Géométrie d'un échangeur de chaleur à tube et calandre.

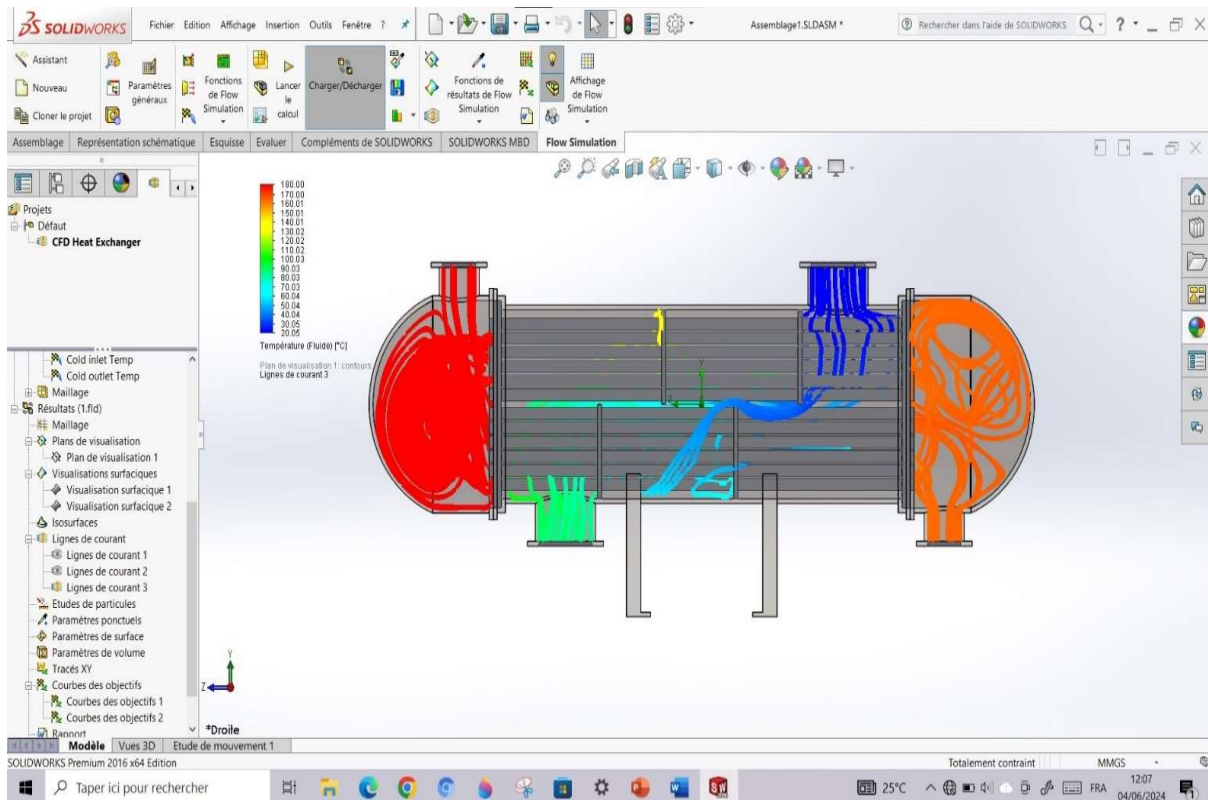


Figure. III. 7. Structure de l'écoulement dans un échangeur de chaleur à tube et calandre.

III.3.2. Domaine de calcul

Dans le cas d'un problème interne, le domaine de calcul enveloppe le volume du fluide dans un modèle. Si le transfert thermique dans les parois est envisagé, les parois du modèle sont également incluses.

Dans le cas d'une analyse externe, le domaine de calcul couvre l'espace environnant du modèle.

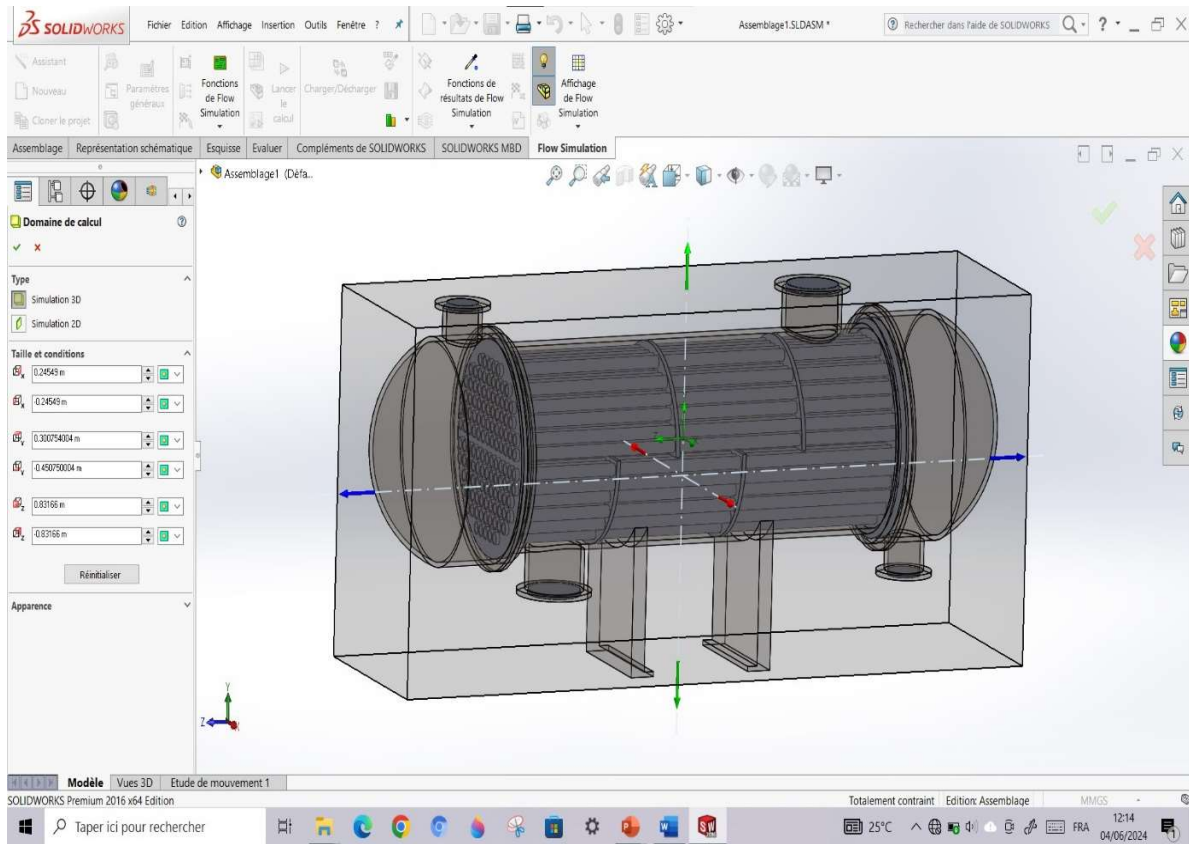


Figure. III. 8. Domaine de calcul

III.3.3. Conditions initiales

Paramètre du solide	Matériel : Calendre : Acier inoxydable satiné Tubes : Cuivre Température initiale du solide : 20,05
Liquide	Eau
Nombre de passes (tube)	1
Nombre de passe (calendre)	1

Table. III. 2 . Conditions initiales du problème.

III.3.4. Conditions aux limites

Les conditions aux limites sont définies et doivent être appliquées à toutes les régions aux extrémités du domaine de calcul à savoir :

- L'entrée du fluide (INLET).
- Le débit massique.
- Cote tube 5 Kg/s.
- Cote calandre 1,2Kg/s.
- La sortie du fluide (OUTLET) pression atm = 1 bar.
- Paroi de la calandre adiabatique.

L'entrée de fluide (Inlet)	La sortie du fluide (Outlet)
Coté tube : 5 Kg/s	Pression atmosphérique : 1 bar
Coté calandre : 1,2 Kg/s	Paroi de la calandre adiabatique

Table. III. 3 Conditions aux limites.

	Fluide Chaud	
Entrée	Température (°C)	180.00
	Débit massique (Kg/s)	5.0000
Sortie	Température (°C)	163.55
	Pression (Pa)	101325.00

	Fluide Froid	
Entrée	Température (°C)	20.05
	Débit massique (Kg/s)	1.2000
Sortie	Température (°C)	87.71
	Pression (Pa)	101325.00

III.4. Hypothèses simplificatrices

Pour simplifier le calcul ; des hypothèses simplificatrices sont prises en considération :

- On considère que l'échangeur de chaleur étudié, est comme un système fermé (on néglige l'échange de chaleur vers l'extérieur) ;
- Le débit-masse de chacun des fluides est constant ;
- Le régime est stationnaire ;
- L'enthalpie perdue par l'un des fluides est intégralement cédée à l'autre ;
- Les températures sont monodimensionnelles et ne varient que dans la direction de l'écoulement ;
- Pas de changement de phase (écoulement monophasique) ;

III.5. Résultats et Discussions

III.5. 1 Profil de vitesse dans un échangeur thermique pour un débit massique du fluide chaud

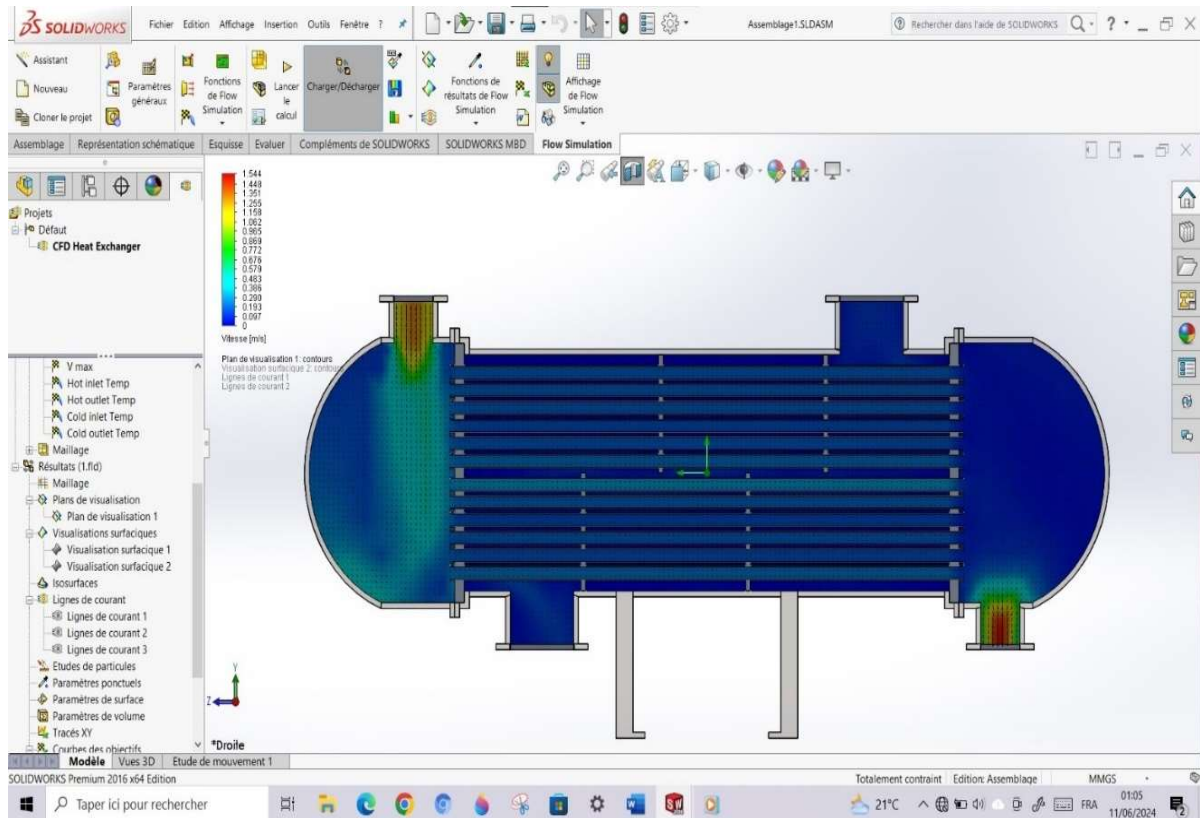


Figure. III. 9. Profil de vitesse dans un échangeur thermique pour un débit massique du fluide chaud

L'évolution du profil de vitesse dans l'échangeur de chaleur est associée à un gradient de température qui varie considérablement. À l'entrée du fluide chaud, la température est de 180°C, diminuant à 164°C à la sortie. Pour le fluide froid, la température initiale de 20,05°C augmente jusqu'à 96,10°C à la sortie. Cette variation significative joue un rôle crucial dans le processus de refroidissement du fluide à travers l'échangeur.

Cette observation se traduit par une augmentation notable du flux thermique échangé dans l'échangeur, influencée par le débit massique du fluide. Lorsque le débit massique augmente, l'échange thermique est intensifié, permettant une dissipation plus efficace de la chaleur. Cette augmentation du débit massique favorise également une efficacité accrue du système de refroidissement en permettant un temps de séjour plus long du fluide dans l'échangeur, optimisant ainsi le transfert thermique global.

III.5. 2 Profil de température dans un échangeur thermique

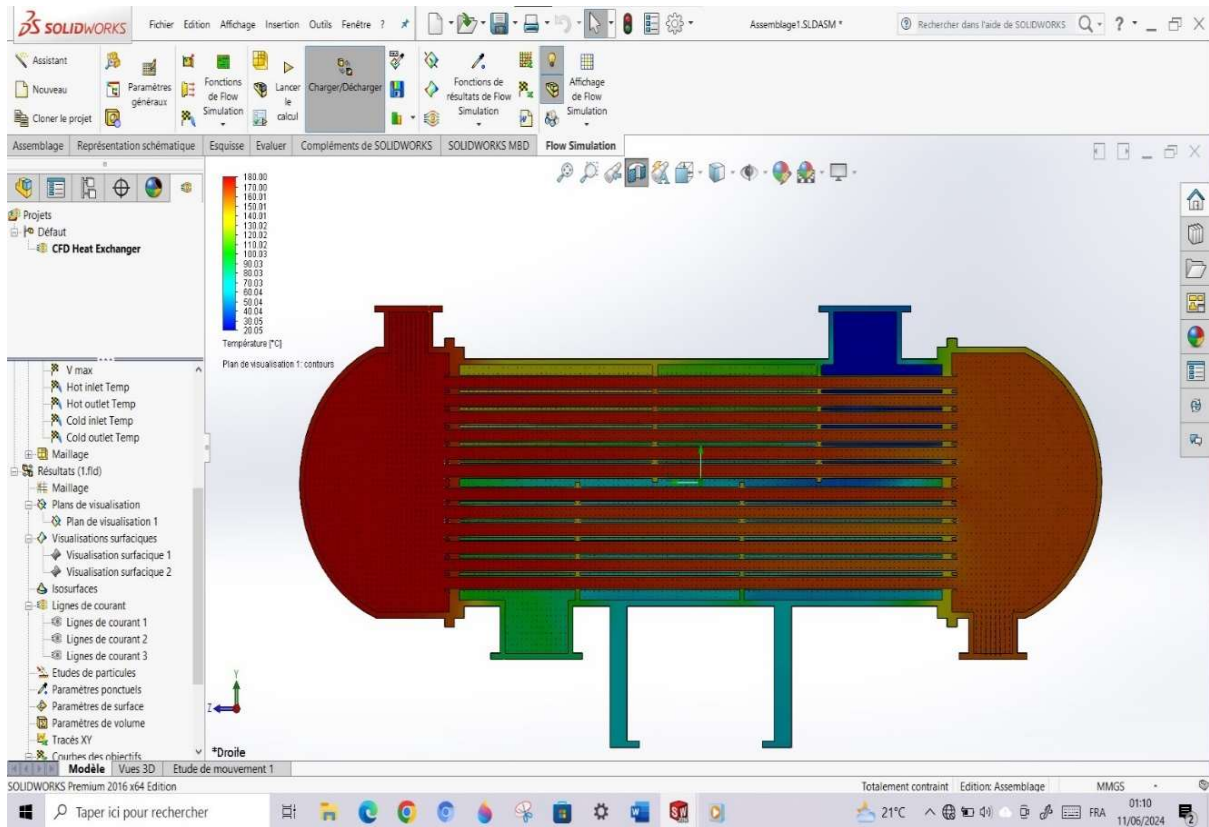


Figure. III. 10. Profil de température à l'intérieur de l'échangeur thermique

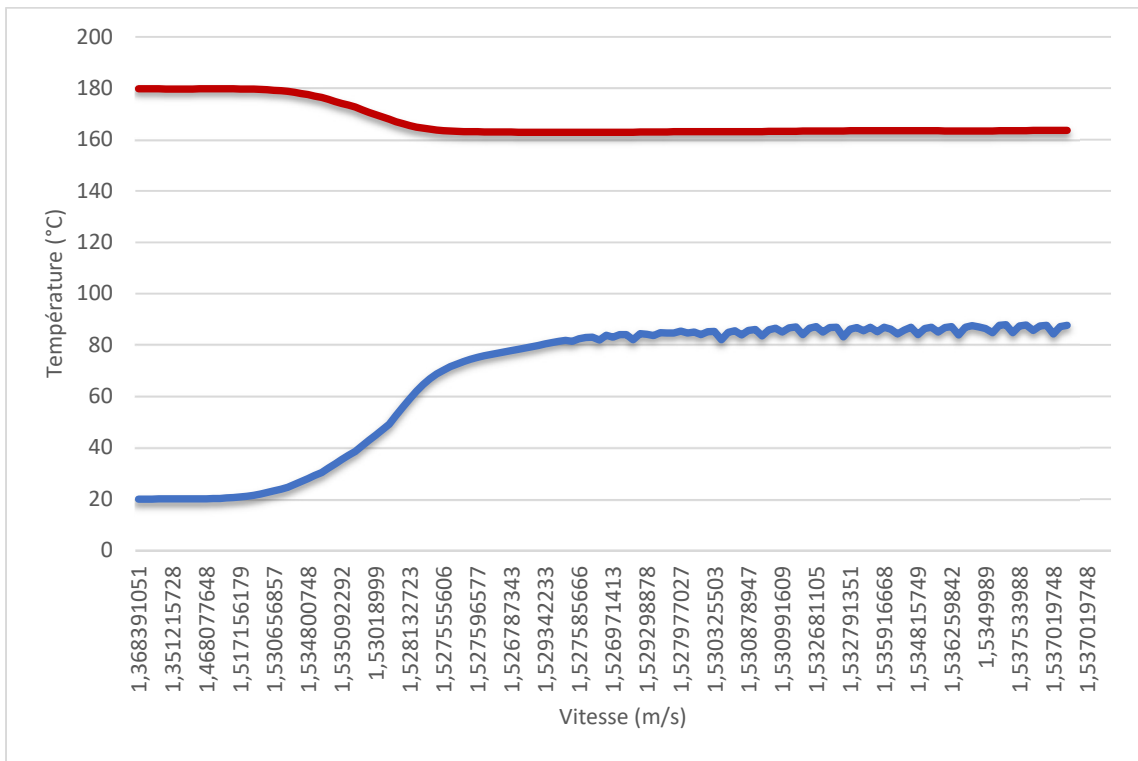


Figure III. 11. Les températures chaud et froid en fonction de vitesse du fluide

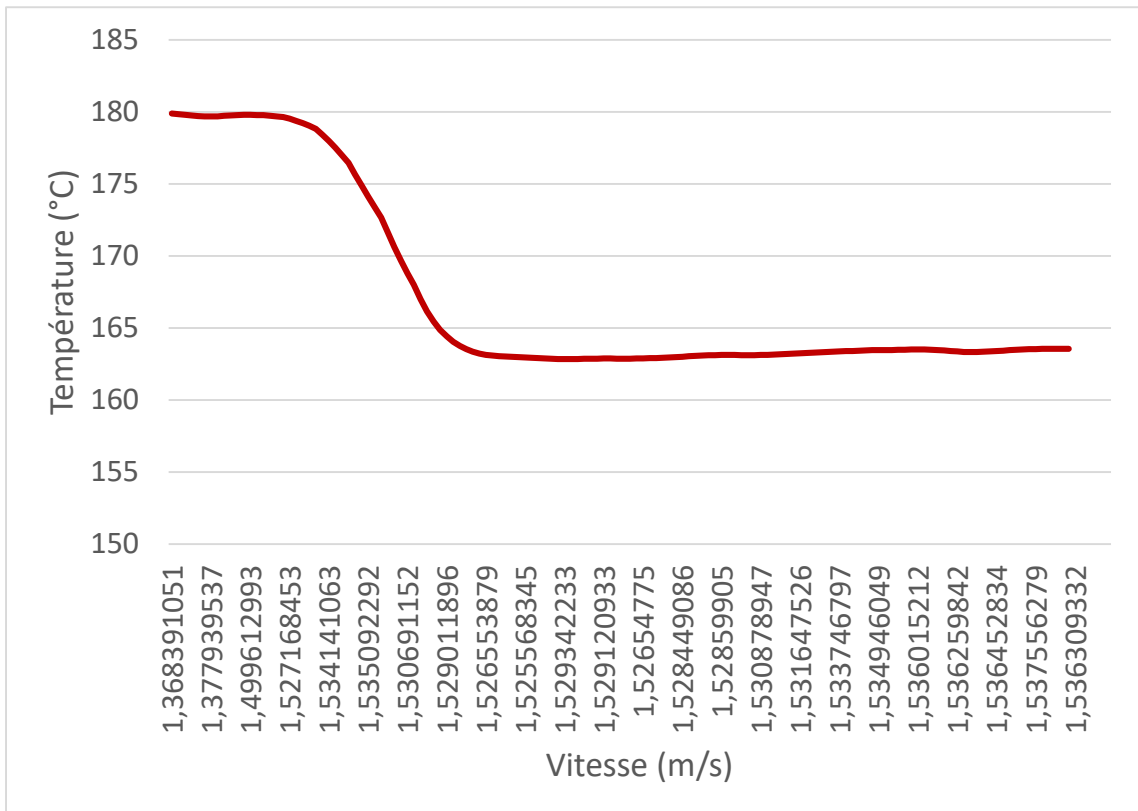


Figure III.12. Chaude température de Sortie

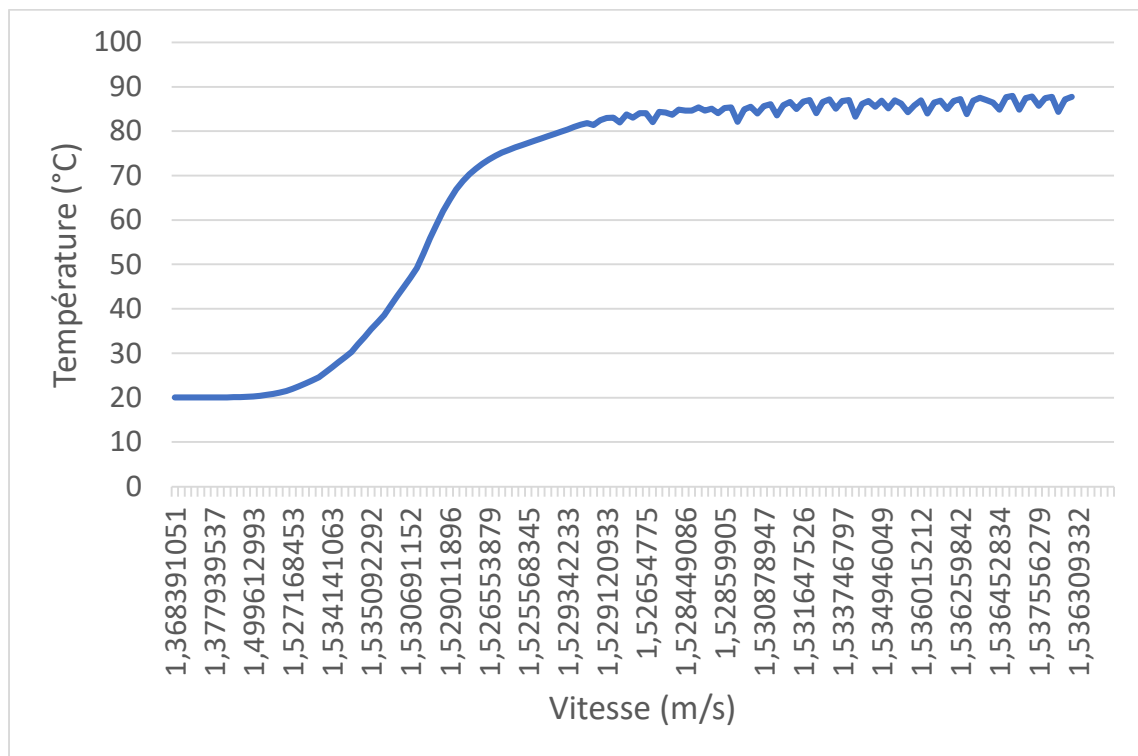


Figure III. 13. température froide de sortie

Voir **Figure III. 14**, **Figure III. 15**, **Figure III. 16**, **Figure III. 17**

L'évolution du profil de température de l'écoulement dans l'échangeur varie de manière significative en fonction de la vitesse du fluide, mesurée en mètres par seconde. Cette variation se caractérise par un gradient de température qui s'étend de 180°C à l'entrée du fluide chaud à 164°C à sa sortie, tandis qu'à l'entrée du fluide froid, la température initiale de 20,05°C augmente à 96,10°C à la sortie. Cette variation significative contribue efficacement au processus de refroidissement du fluide dans l'échangeur.

Cette observation se traduit par une augmentation notable du flux thermique échangé à travers l'échangeur pour différentes vitesses de fluide. À des vitesses plus basses, l'échange thermique est plus efficace, permettant au fluide de bénéficier d'un temps de séjour prolongé dans l'échangeur.

Cela améliore considérablement l'efficacité globale du système de refroidissement, en permettant une dissipation thermique plus complète et efficace.

III.5. 3 Profil de température dans un échangeur thermique à l'extérieur

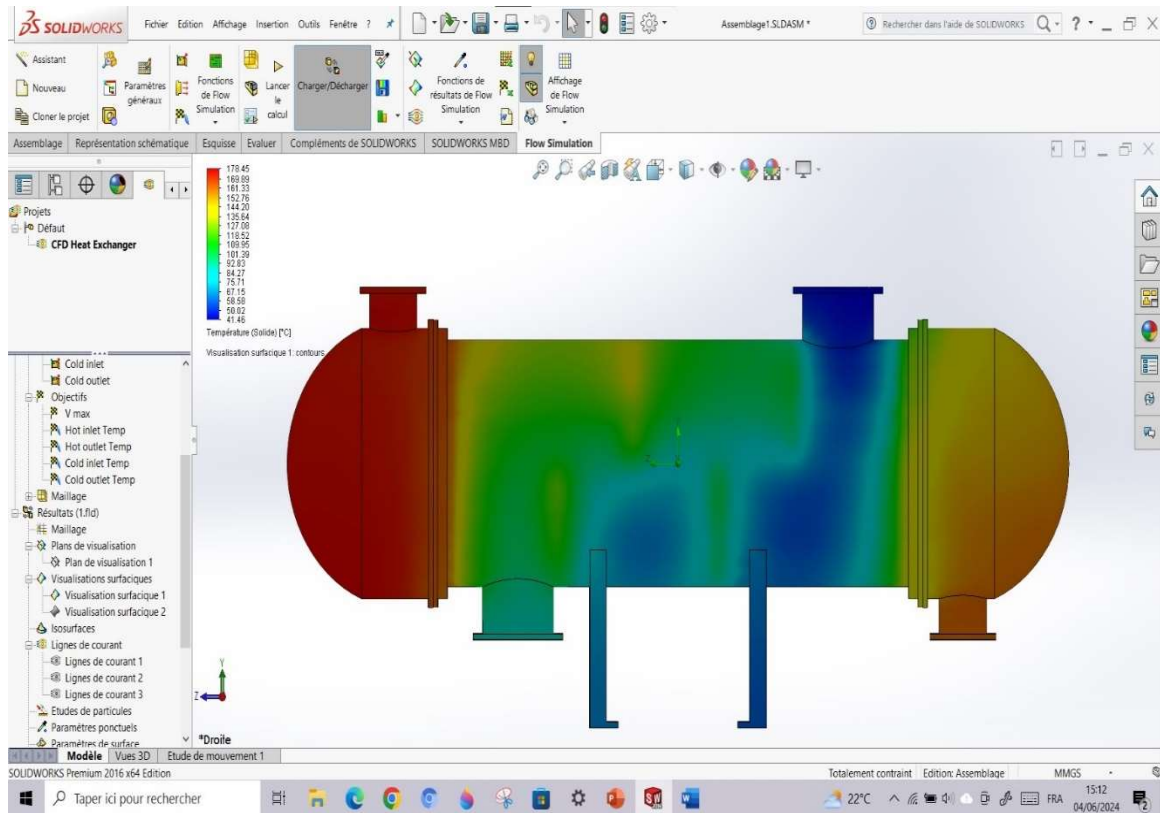


Figure. III.14. Distribution de température dans l'extérieur 'coq' de l'échangeur de chaleur

Voir dans l'entrée de trou de coquille, la température est très chaude, et le fonctionnement de surface est différent à la sortie de trou de fluide froid.

III.5. 4 Profil de trajectoires d'écoulement

L'écoulement du fluide peut être vu dans la figure ci-dessus :

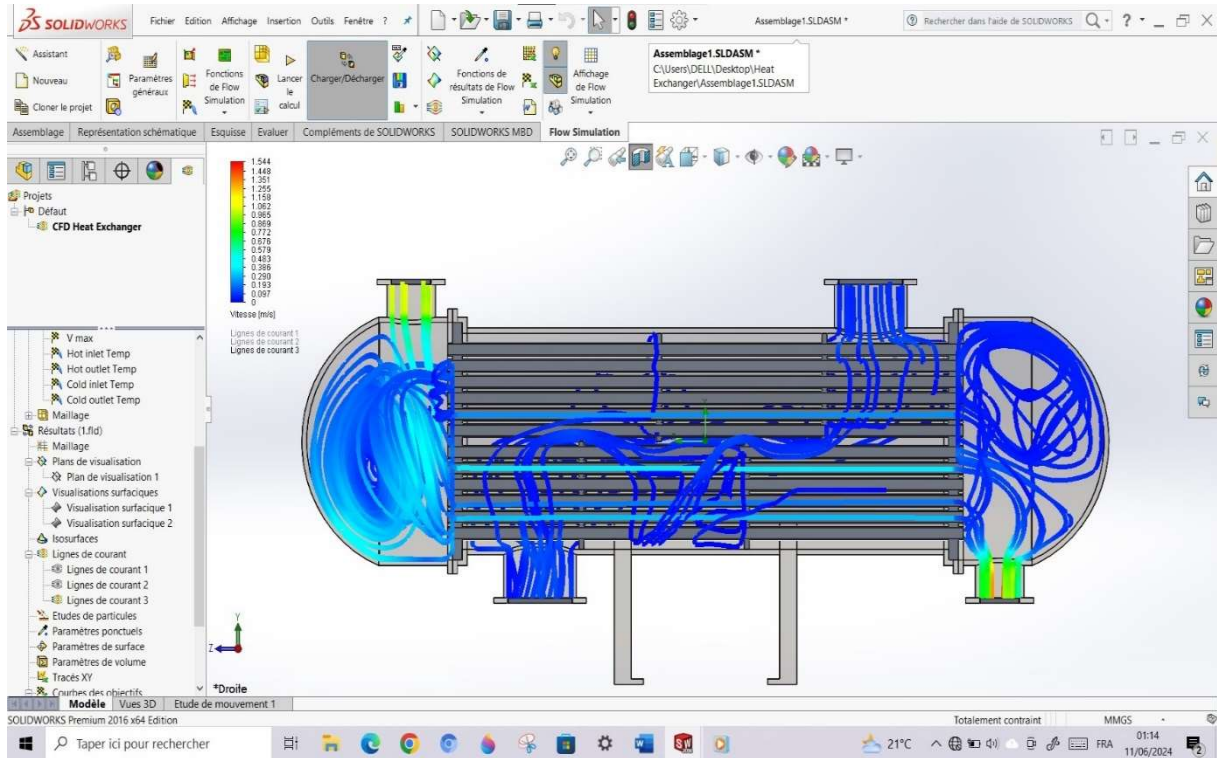


Figure. III.15. Flux de fluide à l'intérieur de l'échangeur de chaleur

Conclusion générale

Conclusion générale

L'échangeur de chaleur est un dispositif permettant de transférer de l'énergie thermique entre deux fluides, habituellement séparés par une paroi solide. Chaque fois qu'on a besoin de réchauffer ou de refroidir un fluide à l'aide d'un autre fluide. Le travail que nous avons effectué, dans le cadre de ce projet présente le dimensionnement d'un échangeur thermique à tubes et calandre et une simulation numérique à l'aide de SolidWorks 2016, nous a permis de qualifier du point de vue thermique la haute performance de cet échangeur pour un débit massique. On a présenté des résultats obtenus sous forme de contour de vitesse, de température, des lignes de courant et des graphes. Ces résultats interprètent d'une manière simple les diverses variations que subit le fluide véhiculé à l'intérieur des tubes ainsi que son échange thermique avec le deuxième fluide aux différentes vitesses. L'augmentation du transfert de chaleur d'un échangeur de chaleur génère des pertes de pression.

Bibliographique

Références bibliographiques

- [1] D. P. D, T. L. B, A. S. L. FRANK P. INCROPERA, Fundamentals of Heat and Mass Transfer, Printed in the United States of America: JOHN WILEY & SONS.
- [2] WEBER Christophe MANIFICAT André, "LES ÉCHANGEURS DE CHALEUR," Bases théoriques, 15 october 2015.
- [3] DECLAYE Sébastien, GENDEBIEN Samuel LEMORT Vincent, P 31, Les Échangeurs de chaleur, the thermodynamics lab University of Liege.
- [4] "Experimental Investigation of Tubular Heat Exchangers to Enhance Performance Characteristics," International Journal of Innovations in Engineering and Science, Vol. 2, No.7, 2017.
- [5] D. N. EDDINE, "MEMOIRE," in simulation d'une conception d'un échangeur de chaleur à faisceau et calandre, Badji Mokhtar ANNABA-University, 2016/2017.
- [6] M. L. B. Y. M. F. Asma, "Dimensionnement d'un échangeur de chaleur tube et calandre par Aspen Hysys," Centre Universitaire Belhadj Bouchaib d'Ain-Temouchent, 29/06/2020.
- [7] A. G. C. G. J. H. C. M. P. M. André B, "Échangeurs de chaleur," in Description des échangeurs. Techniques de l'ingénieur, 1995.
- [8] M. feidt, Thermodynamique et optimisation énergétique des systèmes et procédés, paris : Tec & Doc.
- [9] A. BOUDJELA, Z. SENOUCI, Séminaire sur les échangeurs de chaleur, AIN EL TURK : centre inter entreprise de formation industrielle.
- [10] Zoé Minville, Nasia Caney, Patrice Clement, Philippe Bandelier, Philippe Marty, Jean, Description des échnageurs de chaleur Technique de l'ingénieur [BE 9516].
- [11] site web <https://quizlet.com/fr/786959753/conduction-thermique-flash-cards/>.
- [12] site web <https://ar.madeinwst.com/heat-exchanger/1436089.html>.
- [13] site web <https://ammoniaknowhow.com/heat-exchangers-failures-and-solutions/>
- [14] site web https://fr.m.wikipedia.org/wiki/Fichier:Shell_and_tube_heat_exc.png
- [15] site web http://www.thermique-du-batiment.wikibis.com/echangeur_de_chaleur.php

Bibliographique

- [16] site web <https://www.totalenergies.fr/particuliers/parlons-energie/dossiers-energie/chauffage-et-climatisation/echangeur-thermique-fonctionnement-types-et-efficacite>.
- [17] site web https://fr.m.wikipedia.org/wiki/Colonne_de_Bouhy.
- [18] site web https://fr.m.wikipedia.org/wiki/Fichier:Spiral_block_2.png.
- [19] site web <https://m.french.industrial-ceramicparts.com/supplier-443826-silicon-carbide-ceramics>.
- [20] site web [https://en.m.wikipedia.org/wiki/Radiator_\(engine_cooling\)](https://en.m.wikipedia.org/wiki/Radiator_(engine_cooling)).
- [21] : M.A. BOUCHAALA, “Elaboration d’un programme de calcul pour la détermination des performances des échangeurs de chaleur “, Université d’Oran 2 2017.
- [22] « Third Koniago, » 2022. [En ligne]. Avalable : <https://youtu.be/qjNvtprNaMM?si=eX9cfxD6XJqQxlqT>.