



وزارة البحث العلمي والتعليم العالي
MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR
ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE



جامعة عبد الحميد بن باديس مستغانم

Université Abdelhamid Ibn Badis Mostaganem

كلية العلوم والتكنولوجيا

Faculté des Sciences et de la Technologie DEPARTEMENT DE GENIE DES
PROCEDES

N° d'ordre :M2.../GE/2020

MEMOIRE DE FIN D'ETUDES

DE MASTER ACADIMIQUE

Filière : Génie des procédés

Option: Génie de l'environnement

Thème

Etude thermique de deux écoulements Co-courant et
contre courant dans un échangeur tubulaire

Présenté par M :

1-Mlle Haidra saadia ouafae

2-Mlle Rabahi fatima

Soutenu le : / /

PRESIDENT :

Université

Mostaganem Examineur :

Université Mostaganem Rapporteur :

Université Mostaganem

Année Universitaire

2019/2020

Remerciement

Au terme de ce travail ; je tiens à exprimer ma profonde gratitude à notre cher professeur et encadrant madame hamzaoui pour son suivi et pour son enorme soutien qu'il n'a cessé de nous prodiguer tout au long de la période du projet j'adresse aussi mes vifs remerciements aux membre des jurys pour avoir bien voulu examiner et juger ce travail . MES REMERCIMENT VONT A TOUT LE PERSONNEL que j'ai contacté durant mon étude aupres desquelles j'ai trouvé l'accueil chaleureux l'aide et l'assistance dont j'ai besoin

Nomenclature I Notations latines :

T	Température	[K]
t	Temps	[s]
Q	Quantité de chaleur	[J]
K	Coefficient de transmission thermique	[w /m ² .K]
ϕ	Flux de chaleur	[W]
Cp	Chaleur massique	[J.kg.K ⁻¹]
S	Surface d'échange	[m ²]
Y	Facteur déterminé par les abaques	
h	Coefficient d'échange convectif	[W. m ⁻² .K ⁻¹]
λ	Conductivité thermique	[W /k .m]
Re	Le nombre de Reynolds	
Pr	Nombre de Prandtl	
Nu	Nombre de Nusselt	

Sommaire

REMERCIEMENT	1
NOMENCLATURE I NOTATIONS LATINES :	2
SOMMAIRE.....	3
TABLE DES FIGURES	4
RESUME :	5
INTRODUCTION GENERAL :	6
CHAPITRE 01	
1.DEFINITION :	7
2.TYPES D'ECHANGEUR THERMIQUE :	7
3.LES AUTRES TYPES D'ECHANGEURS THERMIQUES :	11
CHAPITRE 02	
1.ÉCHANGEURS TUBULAIRES :	12
2.LES CATEGORIES D'ECHANGEURS TUBULAIRES :	13
3.LES TYPES D'ECHANGEURS DE CHALEUR :	14
4.TRANSFERT DE CHALEUR :	16
5.FONCTIONNEMENT GENERAL D'UN ECHANGEUR THERMIQUE :	17
6.LES MODES D'ECOULEMENT :	17
7.LE DIMENSIONNEMENT D'UN ECHANGEUR TUBULAIRE :	18
8.LES AVANTAGES ET LES INCONVENIENTS DE L'ECHANGEUR TUBULAIRE :	18
9.APPLICATIONS & CONSTRUCTIONS :	19
10.LA MAINTENANCE D'UN ECHANGEUR DE CHALEUR TUBULAIRE :	21
CHAPITRE 03	
1.COEFFICIENT DE TRANSMISSION THERMIQUE (K) :	22
2.CALCUL DE LA SURFACE DE L'ECHANGEUR :	23
3.CALCUL DE LA PERTE DE CHARGE :	23
4.LE RENDEMENT D'UN ECHANGEUR :	24
CHAPITRE 04	
1.COMPARAISON ENTRE LES DEUX ECOULEMENTS DU FLUIDE CO-COURANT ET CONTRECOURANT :	25
CONCLUSION :	30
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES :	31

Table des figures

Figure 1. échangeur de chaleur à plaque	8
Figure 2.Echangeursde chaleur spiralés.....	9
Figure 3. échangeur de chaleur air air	11
Figure 4.échangeur aillaite	11
Figure 5.echangeur rotatif	11
Figure 6.échangeur faisceaux tubulaire.....	11
Figure 7.Échangeur à tubes et calandre	15
Figure 8.faiceaux de tube	15
Figure 9.graphe de Circulation de fluide à Co-courant.....	26
Figure 10.graphe du Circulation de fluide Co-couran à deux passes coté tubest	27
Figure 11.graphe de Circulation de fluide à contre courant.....	28
Figure 12.graphe du Circulation de fluide contre couran à deux passes coté tubest	28

الملخص :

في هذا العمل، أجرينا بحثاً حول المبادلات الحرارية وأنواعها المختلفة بشكل عام، ثم ركزنا على المبادلات الحرارية الأنبوبية من أجل المقارنة بين نوعي تدفق السيفون بالتيار المشترك والتيار المعاكس واستنتاج أي يتمتع بأداء أفضل وبالتالي يسمح لنا بتحقيق النتائج المرجوة

Résumé :

Dans ce travail on a réalisé une recherche sur les échangeurs de chaleur et leurs différents types en générale puis on se soit focalisé sur les échangeurs de chaleur tubulaires afin de comparer entre les deux sortes d'écoulement siphon co-courant et contrecourant et déduire lequel a une meilleure performance et de ce fait nous permet d'atteindre les résultats souhaités.

Résumé :

In this work, we carried out research on heat exchangers and their different types in general, then we focused on tubular heat exchangers in order to compare between the two kinds of co-current and countercurrent siphon flow and to deduce which has better performance and therefore allows us to achieve the desired results.

introduction général :

Dans les installations industrielles, il est souvent nécessaire d'apporter une quantité de chaleur importante à une partie du système. Dans la majorité des cas, la chaleur est transmise à travers un échangeur de chaleur.

Dans le contexte énergétique actuel, la hausse des prix de l'énergie et la raréfaction des sources d'énergies fossiles poussent la société industrielle contemporaine à devenir de plus en plus performante aussi bien sur l'aspect financier et environnemental que sur l'aspect maîtrise de l'énergie. Ce dernier point essentiel aujourd'hui, conduit les industriels dans une recherche des meilleurs rendements de leurs processus et une baisse de leur consommation énergétique devenus indispensables. L'objectif de performance énergétique par la maîtrise et la rationalisation de l'énergie pour une meilleure efficacité passe en particulier par l'optimisation des différents organes processus. Cette nouvelle stratégie de performance énergétique n'est pas seulement judicieuse du point de vue de l'écologie ou de l'énergie, elle est souvent très rentable pour de nombreux cas, voire même pour des installations de taille réduite. Cette rentabilité impose néanmoins une gestion minutieuse dans les petits systèmes, davantage encore que dans les grandes installations. À partir d'une situation bien définie, la rentabilité ne peut être garantie que par le recours à des solutions techniques optimales offrant le meilleur rendement possible par une gestion dynamique des systèmes. C'est là qu'intervient encore, et ceci depuis toujours, l'échangeur de chaleur. Celui-ci est un élément essentiel de la stratégie de performance énergétique.

Sans conteste l'échangeur de chaleur (ou échangeur thermique) occupe une place primordiale et indispensable dans tous les systèmes thermiques, qu'il soit pour un usage industriel (chimie, pétrochimie, sidérurgie, agroalimentaire, production d'énergie), pour

l'automobile, l'aéronautique ou le bâtiment résidentiel ou tertiaire. De manière générale, on s'accorde à dire que plus de 90% de l'énergie thermique utilisée dans les procédés industriels transite au moins une fois par un échangeur de chaleur

1. Définition :

Les échangeurs de chaleur sont des dispositifs utilisés pour transférer de l'énergie thermique d'un fluide à un autre sans mélanger les deux fluides. Les fluides sont généralement séparés par une paroi solide (avec une conductivité thermique élevée) afin d'empêcher tout mélange ou ils peuvent être en contact direct.

Le matériau composant l'échangeur thermique doit être le plus conducteur possible afin de limiter les pertes thermiques et favoriser l'échange

Pour que l'échange soit possible, les deux fluides devront avoir une température différente : on parle d'écart de température, de delta de température (DT) généralement exprimé en Kelvin (K) ou en degrés Celsius (°C).

2. Types d'échangeur thermique :

Les échangeurs de chaleur sont généralement classés en fonction de la disposition des flux et du type de construction. L'échangeur **de chaleur** le plus simple est celui pour lequel les fluides chauds et froids se déplacent dans le même sens ou dans des directions opposées. Cet échangeur de chaleur est constitué de deux tuyaux concentriques de diamètres différents.

Les types d'échangeur :

2.1. Echangeur a plaque :

- ✚ **Un échangeur à plaques** est un équipement assurant un échange thermique entre deux fluides (liquide ou gazeux). Par sa conception, il est particulièrement adapté dans le cas de fluides chargés en particules. Il s'agit d'un équipement en acier inoxydable très répandu dans l'industrie.
- ✚ **Les échangeurs à plaques, aussi** appelés échangeurs à larges canaux, sont des appareils qui proposent des performances thermiques élevées.



Figure 1. échangeur de chaleur à plaque

Justement, Les plaques soudées sont par la suite déformées par **hydroformage** de manière à former le circuit d'échange de chaleur entre les 2 fluides. **L'échangeur thermique** permet donc un transfert d'énergie calorifique d'un fluide primaire (dit « *chauffant* ») à un fluide secondaire (dit « *chauffé* »). Par conséquent, ce type d'équipement permet **d'augmenter le coefficient d'échange**.

Ces fluides circulent au sein de l'échangeur entre les plaques de diverses manières :

à Co-courant : Les fluides circulent dans la même direction et l'écoulement sera parallèle.

à contre-courant : Les fluides vont traverser les canaux mais cette fois dans des directions inverses assurant les meilleures performances.

à courant croisé : Les deux fluides de l'échangeur vont s'écouler de manière perpendiculaire.

Les fluides thermiques qui circulent au sein de l'échangeur peuvent être de l'air, de l'eau, un gaz, un liquide ... etc. Cependant les échangeurs à plaques sont souvent utilisés pour des transferts de chaleur avec des **deux fluides identiques**, par exemple : **liquide/ liquide** ou **encore gaz/ gaz**.

Enfin, dotés de larges canaux les échangeurs à plaques soudées sont particulièrement adaptés à **des fluides visqueux et Difficiles** notamment chargés en particules

2.2. Echangeurs spiralés :

Les échangeurs spiralés sont des échangeurs circulaires avec 2 canaux spiralés enroulés l'un sur l'autre. Les fluides circulent à contre courant ce qui permet d'atteindre des faibles pincements de température.

L'échangeur spiral est constitué d'une tôle enroulée autour d'un mandrin de façon à constituer un corps spiralé à deux canaux. Les canaux sont soudés sur un bord pour assurer l'étanchéité. L'appareil comporte deux couvercles fixés par crapauds de serrage de part et d'autre du corps spiralé.



Figure 2.Echangeursde chaleur spiralés

2.3. Échangeur lamellaire :

C'est une variante de l'échangeur de type tubes et calandre, dans lequel le faisceau est constitué de tubes aplatis ou lamelles. Ces lamelles sont réalisées à l'aide de deux plaques formées et soudées ensemble et constituant un canal dans lequel circule l'un des fluides.

Chaque lamelle peut contenir un élément interne (tabulateur) qui permet d'obtenir une Meilleure tenue à la pression et un meilleur échange thermique.

Les limites de fonctionnement de cet échangeur sont de 350 °C en température et 25 bar en Pression maximale. Cette technologie d'échangeur est actuellement en pleine mutation.

2.4. Echangeurs air-air :

Échangeurs à plaques air-air, du plus simple au plus complexe, Ces échangeurs sont utilisés depuis longtemps, notamment en sidérurgie pour préchauffer l'air comburant injecté dans les hauts fourneaux en récupérant l'énergie contenue dans leurs fumées. Les usines d'incinération des ordures ménagères peuvent aussi en être dotées ; ils fonctionnent sur le même principe.

On en trouve de plus en plus dans les centrales de traitement d'air à double-flux pour récupérer l'énergie contenue dans l'air extrait avant de rejeter ce dernier dans le milieu naturel ; outre de réduire la consommation d'énergie onéreuse et les rejets de gaz à effet de serre, ça limite également le réchauffement climatique.

Comme leurs cousins eau-eau, ils sont constitués de multiples plaques assemblées en millefeuille dont les intervalles sont parcourus alternativement par l'air neuf (aspiré à la température extérieure) et par l'air extrait (à la température des locaux traités). Pour fonctionner, ils ne nécessitent pas d'autre énergie que celle nécessaire à faire se mouvoir l'air, énergie fournie par la centrale dans laquelle ils sont installés.

La récupération d'énergie se fait tant en mode chauffage qu'en mode rafraîchissement.

Pour qu'ils restent efficaces, l'air les parcourant doit être filtré, ce qui évitera les dépôts nuisibles de poussières sur les plaques. Dans le même esprit et quand l'air neuf est très froid, la vapeur d'eau contenue dans l'air extrait peut condenser (ce qui fournit encore de l'énergie mais nécessite d'évacuer les condensats) voire givrer, ce qui risque d'obturer les canaux d'air extrait et, par là, de réduire l'utilité de la centrale à néant. Dans ces conditions extrêmes, une partie de l'entrée d'air neuf de l'échangeur est

cycliquement obturée, ce qui permet à l'air extrait de réchauffer les plaques à tour de rôle et, par là, d'éviter leur givrage

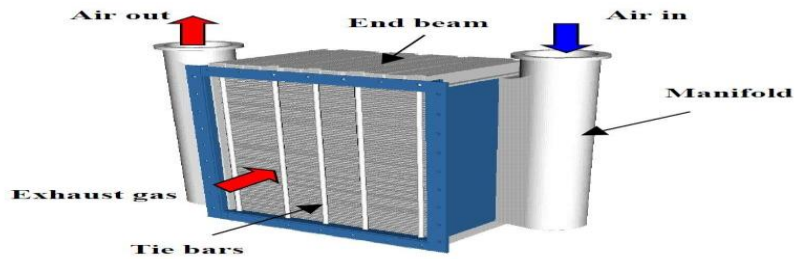


Figure 3. échangeur de chaleur air air

3. Les autres types d'échangeurs thermiques :

Les types d'échangeurs thermiques présentés ci-dessus ne sont pas les seuls disponibles. En effet, il en existe d'autres qui sont quant à eux destinés à des utilisations bien spécifiques, souvent dédiés au milieu de l'industrie. On peut citer : L'échangeur à bloc ou à micro canaux, utilisé dans les unités extérieures des pompes à chaleur .

L'échangeur à ailettes, que l'on trouve dans les radiateurs des véhicules



Figure 4.échangeur aillaite

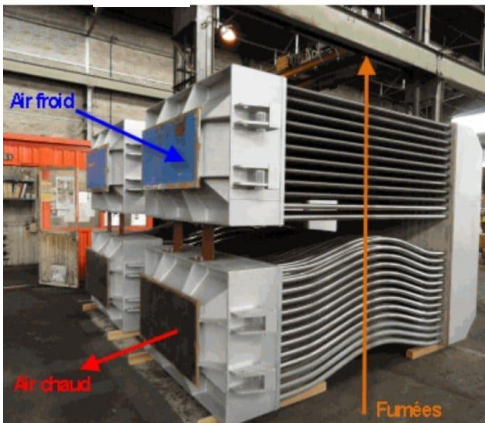


Figure 6.échangeur faisceaux tubulaire

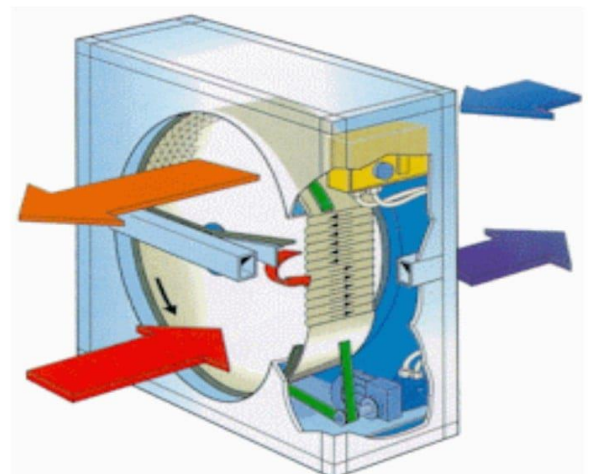


Figure 5.echangeur rotatif

1. Échangeurs tubulaires :

Un échangeur tubulaire est un type d'échangeur de chaleur à tube et calandre, c'est un appareil fortement répandu dans l'industrie dont l'objectif principal est la récupération de chaleur sur gaz ou sur liquide.

Le principe de l'échangeur de chaleur tubulaire repose sur un faisceau de tubes qui est disposé verticalement ou bien horizontalement à l'intérieur d'une enveloppe que l'on nomme la calandre.

Un échangeur tubulaire fonctionne grâce à un échange de chaleur entre deux fluides. D'une part le fluide dit chauffant et d'autre part le fluide chauffé. Ces deux fluides circulent à Co-courant et contre courants ou encore à courant croisés au sein de l'échangeur, l'un à l'intérieur des tubes et l'autre à l'intérieur de la calandre.

Les fluides peuvent être de diverses natures et l'échangeur tubulaire peut permettre un échange : gaz-gaz ; liquide-liquide ; liquide –gaz.

L'échangeur tubulaire est également composé de chicane qui sont placées à l'intérieur de la calandre dans le but d'améliorer le transfert mais aussi de créer des turbulences dans les fluides

de même l'échangeur de chaleur tubulaire est doté de boîtes de distribution pour permettre la bonne circulation du fluide dans le faisceau de tubes.

2. Les catégories d'échangeurs tubulaires :

Il existe différentes catégories d'échangeurs tubulaires en fonction de l'application pour laquelle ils sont utilisés :

2.1. Le condenseur :

dans cette configuration, le but de l'échangeur va être de permettre la transformation d'un gaz en liquide. L'échangeur va donc comme son nom l'indique avoir pour rôle de condenser de la vapeur sur une surface froide.

Le condenseur est donc un système frigorifique qui va permettre un échange de chaleur entre un fluide réfrigérant et un milieu extérieur assurant le changement d'état du fluide à pression constante puis sa désurchauffe ainsi que son sous refroidissement.

De cette manière le fluide sort du condenseur à l'état liquide et non plus gazeux.

2.2. Le refroidisseur :

cette fois le rôle de l'échangeur est de refroidir un liquide.

2.3. Le bouilleur :

c'est un procédé notamment utilisé dans les unités de distillation car l'objectif principal est d'effectuer une vaporisation partielle des fonds de colonne de distillation. On vaporise un mélange de liquide ou bien un mélange de liquide et de solides. Ce procédé est aussi utilisé pour le chauffage.

2.4. Le réchauffeur :

capable de fonctionner dans des conditions extrêmes ; le refroidisseur dans les industries a pour but de réchauffer un volume de liquide ou des gaz.

2.5. L'évaporateur :

son but est de concentrer une solution grâce à un apport d'énergie pour réaliser un changement d'état de la phase liquide à la phase gazeuse.

2.6. Le cristalliseur :

dans cette dernière configuration l'échangeur va permettre d'isoler un produit pour pouvoir le récupérer sous une forme solid

3. Les types d'échangeurs de chaleur :

Différentes catégories existantes Pour des raisons économiques, les échangeurs utilisant les tubes comme constituant principal de la paroi d'échange sont les plus répandus.

On peut distinguer trois catégories suivant le nombre de tubes et leur arrangement, toujours

Réalisés pour avoir la meilleure efficacité possible pour une utilisation donnée :

3.1. Échangeur monotube :

dans lequel le tube est placé à l'intérieur d'un réservoir et a généralement la forme d'un serpent

3.2. Échangeur coaxial :

dans lequel les tubes sont le plus souvent cintrés

Général, le fluide chaud ou le fluide à haute pression s'écoule dans le tube intérieur

3.3. Échangeur multitubulaire:

existant sous quatre formes :

- ✚ **Échangeur à tubes séparés:** à l'intérieur d'un tube de diamètre suffisant se trouvent placés plusieurs tubes de petit diamètre maintenus écartés par des entretoises.

L'échangeur peut être soit rectiligne, soit enroulé,

- ✚ **Échangeur à tubes rapprochés :** pour maintenir les tubes et obtenir un passage suffisant pour le fluide extérieur au tube, on place un ruban enroulé en spirale autour de certains d'entre eux. Les tubes s'appuient les uns sur les autres par l'intermédiaire des rubans
- ✚ **Échangeur à tubes ailettes:** ces tubes permettent d'améliorer le coefficient d'échange thermique.

✚ **Échangeur à tubes et calandre** : c'est l'échangeur actuellement le plus répandu. On voit sur cette photo que l'entrée et la sortie du fluide qui circule à l'intérieur des tubes se font toutes deux sur une même "boîte à eau" ou "chambre" à l'extrémité avant. Cette boîte à eau est divisée horizontalement en deux : une moitié servant à l'alimentation des tubes, l'autre moitié à la collecte. Le fluide qui circule à l'extérieur des tubes, c'est-à-dire dans la virole extérieure ou calandre ("Shell") entre à une extrémité et ressort à l'autre. Ainsi, la moitié de la longueur développée des tubes fonctionne à Co-courants et l'autre moitié à contre-courants. Le croquis suivant permet de mieux comprendre la circulation des fluides.



Figure 7.Échangeur à tubes et calandre

Outre ce qui vient d'être expliqué, on voit qu'en réalité la circulation du fluide côté calandre ne se fait pas le long des tubes mais plus ou moins perpendiculairement à ceux-ci. En effet l'espace de circulation est interrompu par plusieurs plaques, appelées baffles, au travers desquelles passent les tubes et qui obstruent partiellement la section de la calandre. Ainsi le fluide est forcé de contourner ces baffles pour circuler localement à courants-croisés par rapport aux tubes; ce qui intensifie l'échange par convection (plus de turbulence).

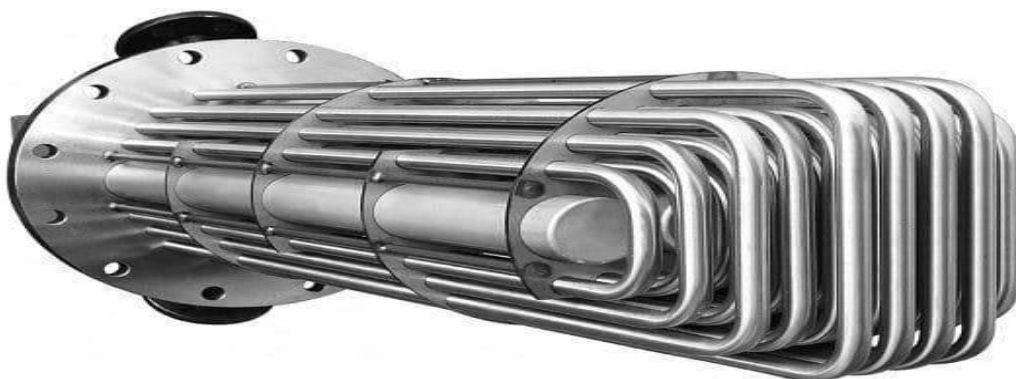


Figure 8.faisceaux de tube

4. Transfert de chaleur :

Le mode de transfert de chaleur est influencé principalement par la nature des fluides et par les niveaux de t° de ceux-ci. Ainsi, dans le cas des liquides c'est la convection qui domine largement pour les transferts de chaleur entre le fluide et la surface d'échange. Par contre, pour les gaz de combustion (fumées) à la sortie d'un four à haute t° (800 ... 1000°C) le rayonnement jouera un rôle déterminant dans le transfert de la chaleur vers la surface d'échange. Par contre, l'air, même à haute t° ne transfère sa chaleur que par convection. En effet, seuls les gaz dont la molécule est au moins triatomique (CO_2 , H_2O , NH_3 , ...) sont en mesure d'émettre ou d'absorber du rayonnement infrarouge de façon significative. L'air étant composé principalement d'azote (N_2 , 79%) et d'oxygène (O_2 , 21%) c'est-à-dire de molécules biatomiques, il n'émet ni n'absorbe l'infrarouge. Ce n'est que lorsqu'il est chargé de vapeur d'eau (H_2O) qu'il devient émetteur-récepteur dans l'infrarouge.

La construction d'un échangeur est évidemment influencée par la possibilité d'exploiter le rayonnement thermique. En effet, le rayonnement infrarouge des gaz est directement lié à l'épaisseur de la couche gazeuse concernée en tant qu'émetteur ou récepteur ("absorbeur"). Ceci est à mettre en relation avec la visibilité en cas de brouillard qui s'exprime comme la distance maximale à laquelle on peut voir correctement. C'est donc bien l'épaisseur de brouillard entre l'objet et l'observateur qui détermine l'absorption de la lumière. Il en va de même pour le rayonnement des gaz. Les récupérateurs de chaleur qui servent au préchauffage de l'air comburant des fours à haute t° (fours de réchauffage en sidérurgie par exemple) seront donc composés de tubes relativement écartés pour disposer d'une épaisseur gazeuse suffisante entre ceux-ci. Du côté de l'air comburant qui circule à l'intérieur des tubes, seule la convection intervient et c'est la vitesse à laquelle l'air circule qui détermine pour une large part l'intensité de la convection.

Dans le cas de l'évaporation ou de la condensation d'un fluide (la vapeur d'eau, les fluides frigorigènes dont l'ammoniac NH_3 et le gaz carbonique CO_2 , etc.) il s'agit de convection même si celle-ci prend

Plusieurs formes particulières suivant la densité de flux transférée : ébullition en film ou nucléée par exemple pour l'évaporation.

5. Fonctionnement général d'un échangeur thermique :

Il existe de nombreuses technologies d'échangeurs de chaleur, mais tous fonctionnent suivant les mêmes processus physiques d'échanges, c'est-à-dire :

- ✚ **la conduction** qui représente les échanges à travers les parois (le plus souvent métalliques),
- ✚ **la convection** qui représente les échanges entre les fluides et les parois,
- ✚ **le rayonnement** qui représente les échanges radiatifs entre les fluides et les parois (principalement infra rouge) bien que ce dernier soit souvent négligeable (car pris en compte uniquement pour un fonctionnement à haute température).

6. Les modes d'écoulement :

On distingue également trois modes d'écoulement différents :

- ✚ **celui à co-courants** : écoulements parallèles des fluides et dans la même direction ;
- ✚ **celui à contre-courants** : écoulements parallèles des fluides mais dans des directions inverses ;
- ✚ **et celui à courants croisés** : écoulements perpendiculaires entre les deux fluides.

Le mode de circulation influence également sur la qualité et l'efficacité du transfert. Un échangeur dit anti-méthodique (ou à co-courants) signifie que l'entrée des deux fluides (chaud et froid) se situe du même côté de l'échangeur. La configuration dite méthodique est celle où les fluides circulent à contre-courants. On l'appelle méthodique car c'est cette configuration qui permet d'obtenir les meilleures performances d'échangeurs. En effet, pour une circulation à co-courant des fluides, la température de sortie du fluide chaud ne pourra pas être plus basse que la température de sortie du fluide froid tandis qu'à contre courant, il est possible d'abaisser la température du fluide chaud à une valeur qui tendra vers la température d'entrée du fluide froid. Des représentations graphiques illustreront plus loin ces distinctions.

7. Le dimensionnement d'un échangeur tubulaire :

La première phase du processus de dimensionnement de l'appareil est celle du choix de la technologie la plus adaptée en fonction du client .En effet, on prend ainsi en compte le rôle que jouera l'échangeur au sein de l'industrie, la place qu'il prendra, le type de fluide, les pressions ou encore les températures.

Une fois que cela est défini il faut ensuite déterminer la puissance thermique de l'échangeur tubulaire et calculer la surface d'échange thermique nécessaire.

Par la suite il est primordial de mesurer la perte de charge admissible, c'est-à-dire la perte d'énergie que subit un fluide en mouvement.

Une fois que les plans de construction sont prêts l'échangeur de chaleur tubulaire est envoyée en fabrication.

Les échangeurs tubulaires sont notamment fabriqués en acier inoxydable duplex Uranus alliage nickel ou en incoloy.

8. Les avantages et les inconvénients de l'échangeur tubulaire :

8.1. Les avantages des échangeurs de chaleur tubulaires:

- ✚ Échangeurs de chaleur tubulaires sont des échangeurs extrêmement robustes.
- ✚ C'est là un des principaux avantages de la technologie, car ils sont virtuellement utilisables dans toutes les applications, et capables de résister à des températures et pressions extrêmes tout en acceptant des écarts de température importants.
- ✚ Corollaire de la robustesse, il s'agit également d'échangeurs très fiables, qui ne sont pas près de manquer à leur propriétaire.



8.2. Les inconvénients des échangeurs de chaleur tubulaires :

- ✚ Cependant, c'est bien là tout ce que l'on peut leur trouver.
- ✚ En effet, les échangeurs de chaleur à plaques, leurs principaux concurrents.
- ✚ Cela est dû à plusieurs facteurs.
- ✚ Tout d'abord, les échangeurs tubulaires sont extrêmement encombrants.
- ✚ Ils peuvent mesurer jusqu'à 40 mètres de long et 5 mètres de large, et prennent donc beaucoup de place.
- ✚ Une place précieuse qui pourrait être réutilisée pour installer un nouveau procédé, un système de récupération d'énergie par stockage, etc.
- ✚ C'est un des inconvénients majeurs des échangeurs tubulaires.
- ✚ Autre inconvénient : dans un échangeur tubulaire, la turbulence du fluide est relativement faible, ce qui signifie qu'il est très sujet à l'encrassement.
- ✚ C'est un réel problème car, dans l'industrie, les fluides utilisés sont souvent sales et déposent donc à l'intérieur des tubes.
- ✚ La maintenance d'un échangeur tubulaire, du fait de sa taille, n'est pas des plus aisées, et c'est encore un paramètre à prendre en compte lors du choix d'un échangeur.
- ✚ Les échangeurs thermiques tubulaires ont un troisième inconvénient majeur.
- ✚ Ils ne sont pas très performants.
- ✚ Du fait de la faible turbulence et de la surface d'échange moindre (par rapport à un échangeur à plaques), la performance d'un échangeur tubulaire est plutôt faible.
- ✚ À l'heure où récupération de chaleur, performance et optimisation sont dans toutes les bouches, cela n'ajoute pas à la réputation des tubes.

9. Applications & constructions :

La conception et la fabrication d'un échangeur de chaleur sont des processus beaucoup plus complexes qu'il n'y paraît à première vue. En effet, il faut prendre en compte différents facteurs qui, comme souvent, sont contradictoires :

optimiser et structurer la surface d'échange c'est-à-dire éviter les m^2 qui sont peu efficaces (voir première partie de cet article);

réduire autant que possible l'encombrement de l'appareil (compacité);

maximiser les coefficients de transferts thermiques (convection et rayonnement) entre chacun des fluides et la surface d'échange;

maximiser la conduction au sein de la surface d'échange elle-même;

minimiser les pertes de charges pour les deux fluides;

assurer l'étanchéité des deux côtés;

permettre la dilatation thermique différentielle de tous les composants;

éviter l'encrassement de la surface d'échange et organiser son nettoyage éventuel;

éviter la corrosion (choix des matériaux);

limiter la fatigue thermique éventuelle.

Pour ne donner qu'un exemple du caractère contradictoire de ces facteurs, on peut regarder de plus près la question des coefficients de transferts thermiques et celle des pertes de charge. Pour augmenter la convection entre un fluide et un tube d'échangeur, il faut avant tout augmenter la vitesse de circulation du fluide. Malheureusement, ce faisant, la perte de charge dans les tubes augmente comme le carré de la vitesse. On comprend donc facilement qu'il y a lieu de réaliser un compromis entre les deux facteurs et que ce compromis ne peut être trouvé qu'en calculant l'échangeur dans son ensemble. En effet, si la vitesse augmente, la convection augmente et l'on pourra réduire la surface d'échange en conséquence. Par ailleurs, l'augmentation de la vitesse induit une augmentation sensible de la perte de charge mais la réduction de la surface d'échange implique une réduction de la longueur des tubes et d'aussi de la perte de charge. Comme aucune de ces influences n'est simplement linéaire, seul un calcul détaillé permet de trouver l'optimum.

En pratique, l'application visée détermine largement l'orientation que prennent dès le départ la conception et la fabrication d'un échangeur. Il n'est pas possible de donner ici un inventaire des applications et des solutions existantes. Prenons plutôt quelques exemples parmi les plus courants.

10. La maintenance d'un échangeur de chaleur tubulaire :

C'est le principal « souci » de l'échangeur de chaleur tubulaire : considérant sa taille (souvent plus d'une dizaine de mètres de long) et le peu de turbulences rencontrées par les fluides qui y circulent, il est souvent sujet à l'encrassement.

S'il est moins cher que l'échangeur à plaques et s'il résiste mieux aux très hautes pressions, la maintenance de l'échangeur de chaleur tubulaire est donc moins aisée, d'autant qu'il faut la confier à un professionnel extérieur !

Les tubes doivent ainsi être retirés, selon un processus strict et réglementé, puis inspectés.

Une fois ceci effectué, il faut utiliser un jet à haute pression pour retirer les traces d'encrassement et de calcaire, avant de replacer les modules dans l'échangeur de chaleur tubulaire.

Certaines pièces peuvent également être changées, selon l'état d'encrassement

1. Coefficient de transmission thermique (k)

Le coefficient de transmission thermique d'une paroi est noté "U" (ou anciennement "k") et caractérise la quantité de chaleur traversant une paroi en régime permanent, par unité de temps, par unité de surface et par unité de différence de température entre les ambiances situées de part et d'autre de ladite paroi.

Le coefficient de transmission thermique s'exprime en $W/m^2 K$ est l'inverse de la résistance thermique totale (R_T) de la paroi.

Plus sa valeur est faible et plus la construction sera isolée.

Calcul de K et prise en compte de l'encrassement

Le coefficient d'échange d'un échangeur est donné par la formule ci-contre :

h_1 et h_2 : coefficients d'échange correctifs locaux, calculés sur la base de corrélations et de nombre adimensionnels tels que le **Reynolds** (Re), le **Prandtl** (Pr) et le **Nusselt** (Nu).

$$\frac{1}{K_{encrassé}} = \frac{1}{h_1} + \frac{1}{h_2} + \frac{e}{\lambda} + R_{encrassement}$$

e : épaisseur de la paroi en m

λ : conductivité thermique de la paroi en $W/^\circ C/m$

$R_{encrassement}$: résistance due à l'encrassement de la paroi

2. Calcul de la surface de l'échangeur :

On commence par **déterminer le DTLM** (Différence de Température Logarithmique Moyenne).

Le DTLM (ΔTLM) est la moyenne logarithmique des pincements de température à chaque extrémité de l'échangeur

$$\Delta TLM = \frac{[(Te1 - Ts2) - (Ts1 - Te2)]}{[\ln(Te1 - Ts2) - \ln(Ts1 - Te1)]}$$

$Te1 : T_{\text{entrée froid}}$
 $Te2 : T_{\text{entrée chaud}}$
 $Ts1 : T_{\text{sortie froid}}$
 $Ts2 : T_{\text{sortie chaud}}$

Une fois qu'on a calculé le ΔTLM et estimé la puissance totale échangée, on peut **dimensionner l'échangeur** à l'aide de la formule suivante :

$$Q_{\text{totale inchangée}} = K \times S \times \Delta TLM$$

K : coefficient d'échange exprimé en $KW/^\circ C/m^2$. Il dépend de l'échangeur et est calculé par le fabricant.

S : surface de l'échangeur en m^2

Il reste à présent 2 **données** inconnues : K et S. Il faut calculer le K pour estimer la surface de l'échangeur.

3. Calcul de la perte de charge :

Un fluide en mouvement subit des pertes d'énergie dues aux frottements sur les parois (pertes de charge régulières) ou à des accidents de parcours (pertes de charge singulières)

comme des chicanes, par exemple. Cette perte d'énergie, exprimée en différence de pression (ΔP), doit être compensée afin de permettre au fluide de se déplacer.

Une fois l'échangeur dimensionné, il faut donc calculer les **pertes de charges de l'échangeur** grâce à différentes corrélations déterminées en fonction des caractéristiques des surfaces d'échange.

Les étapes 2 et 3 sont réalisées en interdépendance et par itération, comme le montre le schéma récapitulatif ci-contre.

4. Le Rendement D'un Echangeur

Il ne faut pas confondre rendement et efficacité. En effet, on considère l'absence de perte et donc que **l'efficacité d'un échangeur thermique** est égale à 1.

Le rendement correspond lui la formule suivante :

$$\frac{\text{Puissance que je récupère}}{\text{Puissance que je pourrais récupérer}}$$

Le rendement de 1 est donc un infini impossible à atteindre. Le rendement est induit par les besoins en puissances et en températures de l'application du client. Il est donc, dans la majorité des cas, fixé dès la demande par le client lui-même.

1. Comparaison entre les deux écoulements du fluide Co-courant et contrecourant :

Dans un échangeur de chaleur, on cherche en général à transférer un flux de chaleur $E_{\text{changé}}$ (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 ΔT . 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:

$$E_{\text{changé}} = K S \Delta T$$

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 ΔT_{ml} , soit:

$$\Phi_{\text{échangé}} = K S \Delta T_{\text{ml}}$$

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.

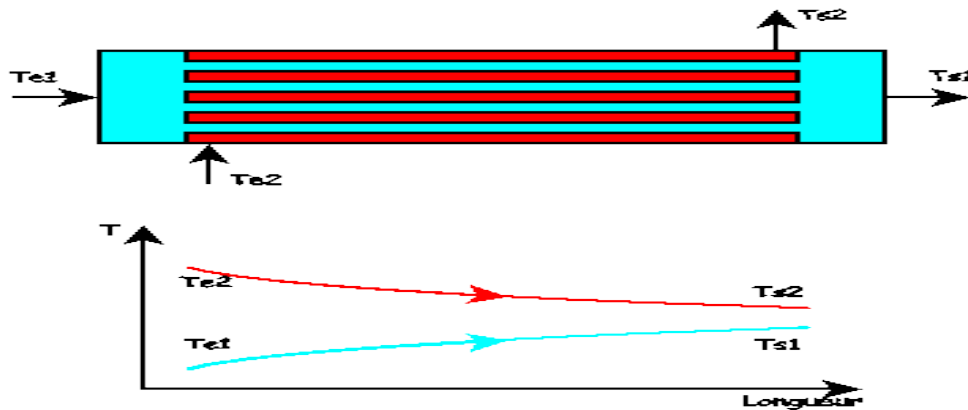


Figure 9. graphe de Circulation de fluide à Co-courant

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 $Te2 - Te1$

L'écart de température à l'extrémité droite (ici sortie) est $Ts2 - Ts1$

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

$$\Delta T_{ml} = [(Te2 - Te1) - (Ts2 - Ts1)] / \ln [(Te2 - Te1) / (Ts2 - Ts1)]$$

$$\Phi_{\text{échangé}} = K S Y \Delta T$$

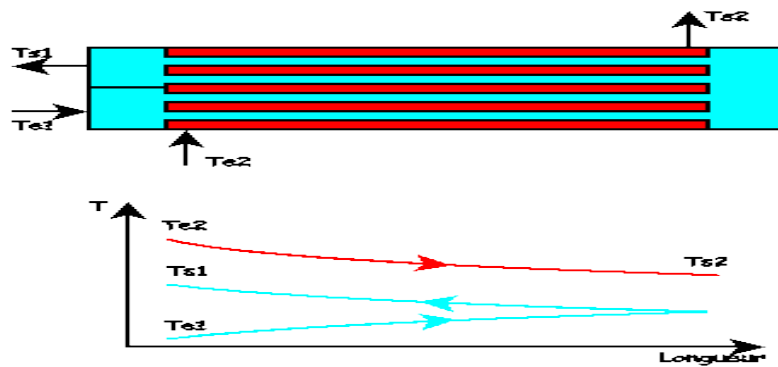


Figure 10. graphe du Circulation de fluide Co-courant à deux passes côté tubest

$$\Phi_{\text{échangé}} = K S Y \Delta T$$

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 (voir un cours d'échange thermique pour plus de détails), soit:

$$\Phi_{\text{échangé}} = K S Y \Delta T_{ml}$$

$$\Delta T_{ml} = [(Te2 - Ts1) - (Ts2 - Te1)] / \ln [(Te2 - Ts1) / (Ts2 - Te1)]$$

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.

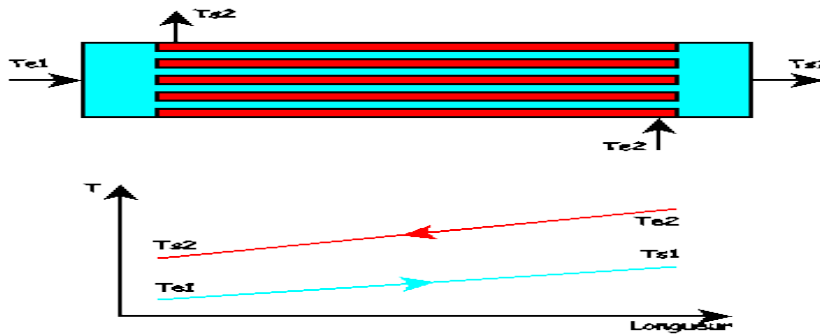


Figure 11.graphes de Circulation de fluide à contre courant

$$\Delta\theta_{ml} = \frac{(Te2 - Ts1) - (Ts2 - Te1)}{\ln \frac{Te2 - Ts1}{Ts2 - Te1}}$$

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 $Ts2 - Te1$

L'écart de température à l'extrémité droite (entrée chaude, sortie froide) est $Te2 - Ts1$

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

$$\Delta T_{ml} = [(Te2 - Ts1) - (Ts2 - Te1)] / \ln [(Te2 - Ts1) / (Ts2 - Te1)]$$

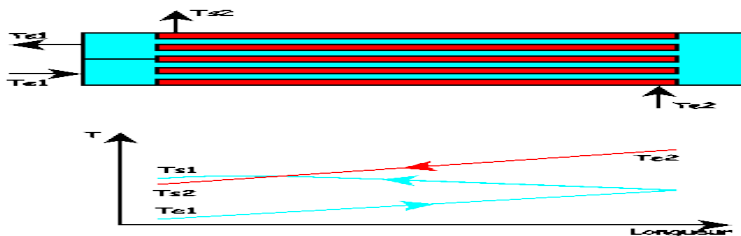


Figure 12.graphes du Circulation de fluide contre couran à deux passes coté tubest

$$\Phi_{\text{échangé}} = K S Y \Delta T_{\text{ml}}$$

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 (voir un cours d'échange thermique pour plus de détails), soit:

$$\Phi_{\text{échangé}} = K S Y \Delta T_{\text{ml}},$$

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

Il est rarement possible de concevoir un échangeur qui soit totalement à Co-courant ou totalement à contre-courant. Le plus souvent les échangeurs réels sont partiellement à Co-courant, partiellement à contre-courant ou bien encore à courants croisés.

Leur fonctionnement s'écarte de celui d'un échangeur parfait à contre-courant. Leur efficacité s'en trouve réduite, et ceci est représenté dans le calcul par un facteur correctif de la différence de température moyenne.

Conclusion :

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 une paroi qui est le plus souvent métallique ce qui favorise les 'échange de chaleur.

Le fluide chaud se refroidit au contact du fluide froid et le fluide froid se réchauffe au contact du fluide chaud jusqu'à l'équilibre thermique entre les deux milieux soit obtenue, c'est le principe zéro de la thermodynamique sur lequel le mode opératoire des échangeurs de chaleur est principalement basé, la conception des échangeurs impose en général des compromis pour répondre au mieux à toutes ces contraintes et il convient de toujours terminer la démarche de conception par un calcul de validation.

Pour calculer les différents paramètres d'un échangeur on a plusieurs méthodes et parmi ces méthodes il y'a les méthodes analytiques comme la ΔT_{ML} ou numériques comme volume fini, dans notre cas on a utilisé la méthode de ΔT_{LM} dans le but de déterminer la température de sortie de chaque fluide, le flux thermique échangé, la surface d'échange et l'efficacité de n'importe quel échangeur tubulaire par l'utilisation d'un logiciel de programmation Matlab. D'après les graphes, on constate une liaison proportionnelle entre l'efficacité et la longueur de l'échangeur, c'est-à-dire si la longueur augmente l'efficacité augmente, d'autre part une liaison proportionnelle inverse entre les températures du deux fluides chaud et froid (dodécane, l'eau industrielle) selon la longueur d'échangeur. Alors on peut obtenir une efficacité maximale quand la température du deux fluides chaud et froid a la même valeur.

Références bibliographiques :

[1]: Site WEB <http://processs.free.fr/Pages/VersionClassique.php?page=4552>.

[2]: Site WEB: http://dspace.univ-tlemcen.dz/bitstream/112/5218/4/Chapitre_I_.pdf.

[3]: Site WEB: <https://www.factoryfuture.fr/fonctionnement-echangeur-tubulaire/>.

[4]: Site WEB: <http://www.thermofin.net/fr/produits/caleos-echangeurs-faisceau-tubulaire/>.

[5]: Site WEB: <http://processs.free.fr/Pages/VersionClassique.php?page=4526>.

[6]: Site WEB: <https://www.ets.ch/fr/index.php/produits/echangeurs-de-chaaleur-ailettes>.

[7]: Alfa-Laval, Les cahiers Alfa-Laval, Spécial Thermique, N°17, 1987

[8]: Documentations techniques fabricants (Mueller , Super changer, Alfa-Laval).

(6) Padet J., Echangeurs thermiques, Masson, 1993. (BIB'IN