

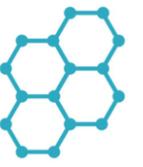
2.4 - Énergie thermique

2.4.5 Échangeurs thermiques

Daniel R. Rousse, ing., Ph.D.

Département de génie mécanique

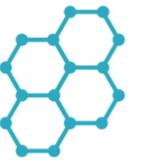
Vincent Chapotard



Question

- Quelles sont les deux types d'analyse classique pour dimensionner les échangeurs de chaleur?
 - Conventiionnelle et simplifiée
 - LTDD & NUT
 - LMTD & NTU
 - Direct et transitoire
 - Aucune de ces réponses

Question



ENR2020

- Quelles sont les deux types d'analyses pour dimensionner les échangeurs de chaleur?
 - **LMTD & NTU**
 - LMTD : **L**ogarithmic **M**ean **T**emperature **D**ifference
 - NTU : **N**umber of **T**ransfer **U**nits

Plan de la présentation

- Introduction et objectifs de la capsule
- Types d'échangeurs
- Méthodologie de calcul
- Coefficient de transfert thermique global
- Analyse : différence de température logarithmique moyenne (LMTD)
- Analyse : Méthode NUT (NTU)
- Hydrodynamique
- Échangeurs compacts
- Conclusion

Plan de la présentation

- ***Introduction et objectifs de la capsule***
- Types d'échangeurs
- Méthodologie de calcul
- Coefficient de transfert thermique global
- Analyse : différence de température logarithmique moyenne (LMTD)
- Analyse : Méthode NUT (NTU)
- Hydrodynamique
- Échangeurs compacts
- Conclusion

Introduction et objectifs

- Pourquoi un rappel sur les échangeurs thermiques?
 - Ils sont employés dès que de l'énergie thermique doit être récupérée
 - Dans un courant d'air ou de gaz de combustion;
 - Dans un courant ou un réservoir d'eau, d'huile thermique, de sels fondus.
 - Ils interviennent en :
 - Énergie solaire (thermique, thermodynamique, PV/T)
 - Énergie géothermique (toutes les applications)
 - Énergie biologique (presque toutes les applications)
 - Énergie hydraulique ou océanique (lorsque qu'une rivière ou un grand réservoir (lac, mer, réservoir artificiel) est employé pour usage thermique)
 - Stockage d'énergie (thermique, thermochimique, thermodynamique, thermorégulation des batteries et accumulateurs, air comprimé, etc.)

Introduction et objectifs

- Objectifs de cette présentation
 - Connaître divers types d'échangeurs;
 - Comprendre le fonctionnement des échangeurs;
 - Comprendre deux méthodologies de calcul des échangeurs;
 - Calculer les taux de transfert, les efficacités et les rendements des échangeurs;
 - Connaître les implications hydrodynamiques en termes de pertes de pression.

Dans les cours Énergie et Énergies renouvelables, les calculs des échangeurs thermiques seront des plus simples. Le matériel présenté ici est complet voire exhaustif mais toutes ces notions ne seront pas employées pour calculer les échanges thermiques dans les problèmes suggérés qui resteront d'un niveau élémentaire.

Plan de la présentation

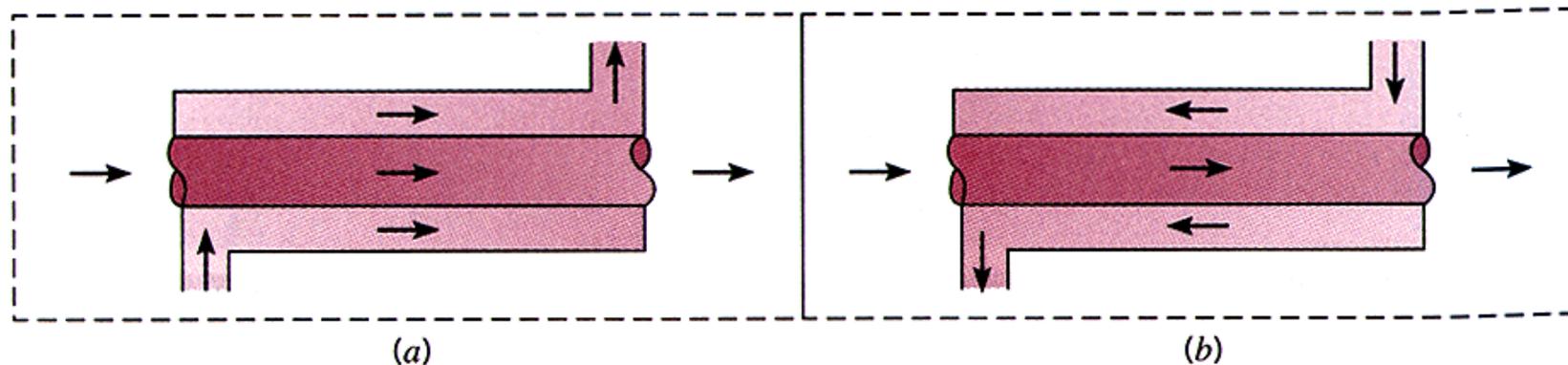
- Introduction et objectifs de la capsule
- ***Types d'échangeurs***
- Méthodologie de calcul
- Coefficient de transfert thermique global
- Analyse : Différence de température logarithmique moyenne (LMTD)
- Analyse : Méthode NUT (NTU)
- Hydrodynamique
- Échangeurs compacts
- Conclusion

Types d'échangeurs

- Qu'est-ce qu'un échangeur de chaleur?
 - C'est un équipement qui permet d'assurer un transfert de chaleur d'un fluide chaud à un fluide froid sans un contact direct entre les fluides.
 - On rencontre les échangeurs de chaleur dans l'industrie et dans la vie quotidienne sous diverses appellations : ex.
 - économiseurs, réchauffeurs d'air, surchauffeurs,
 - condenseurs, bouilloires, refroidisseurs,
 - radiateurs d'automobiles,
 - radiateurs de chauffage central,
 - évaporateurs

Types d'échangeurs

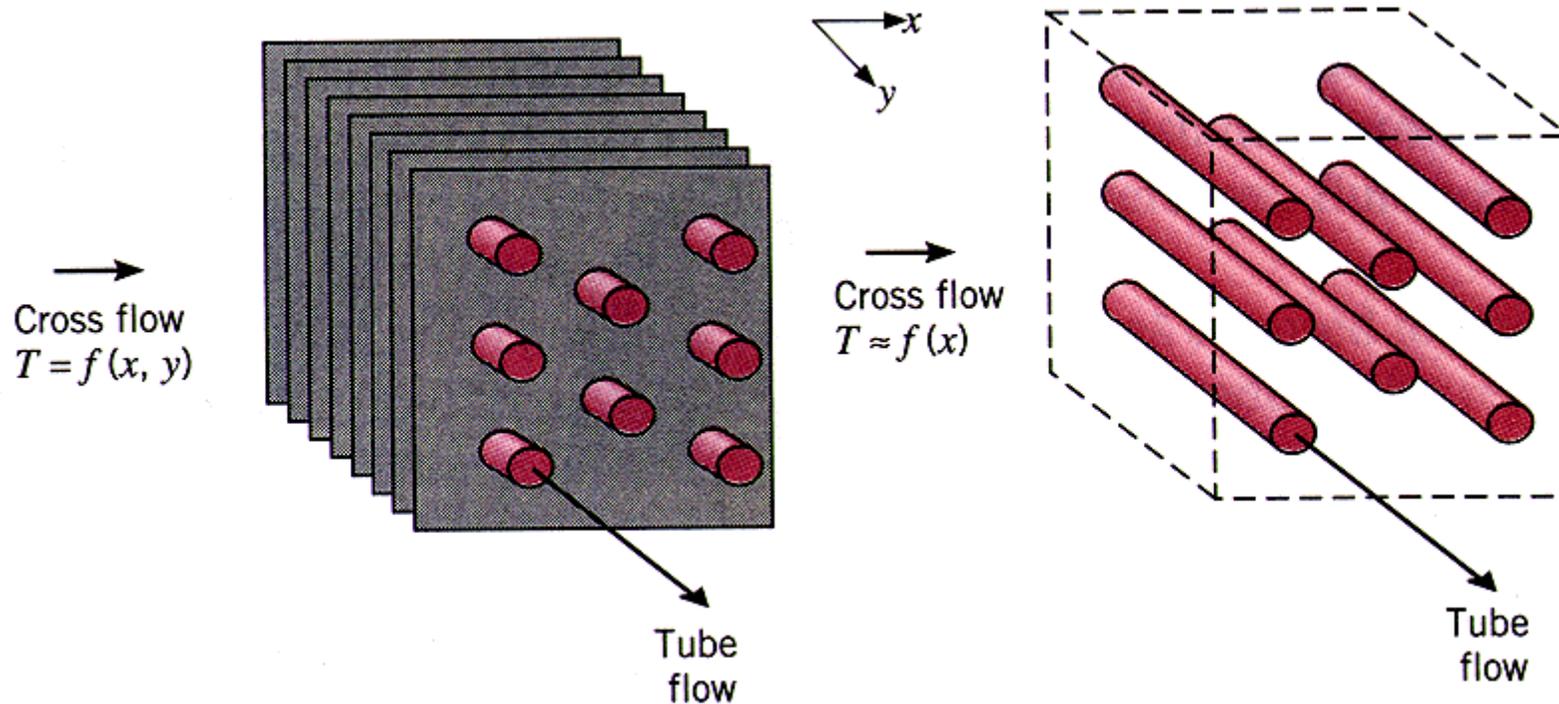
- Les échangeurs sont classifiés selon la configuration des écoulements et selon leur type de construction :
 - Co-courant, contre-courant, courant croisés;
 - Tubes concentriques, tubes doubles, à plaque, à ailettes, coque et tube (à faisceaux tubulaires).



Échangeurs à tubes concentriques : a) co-courant; b) contre-courant

Types d'échangeurs

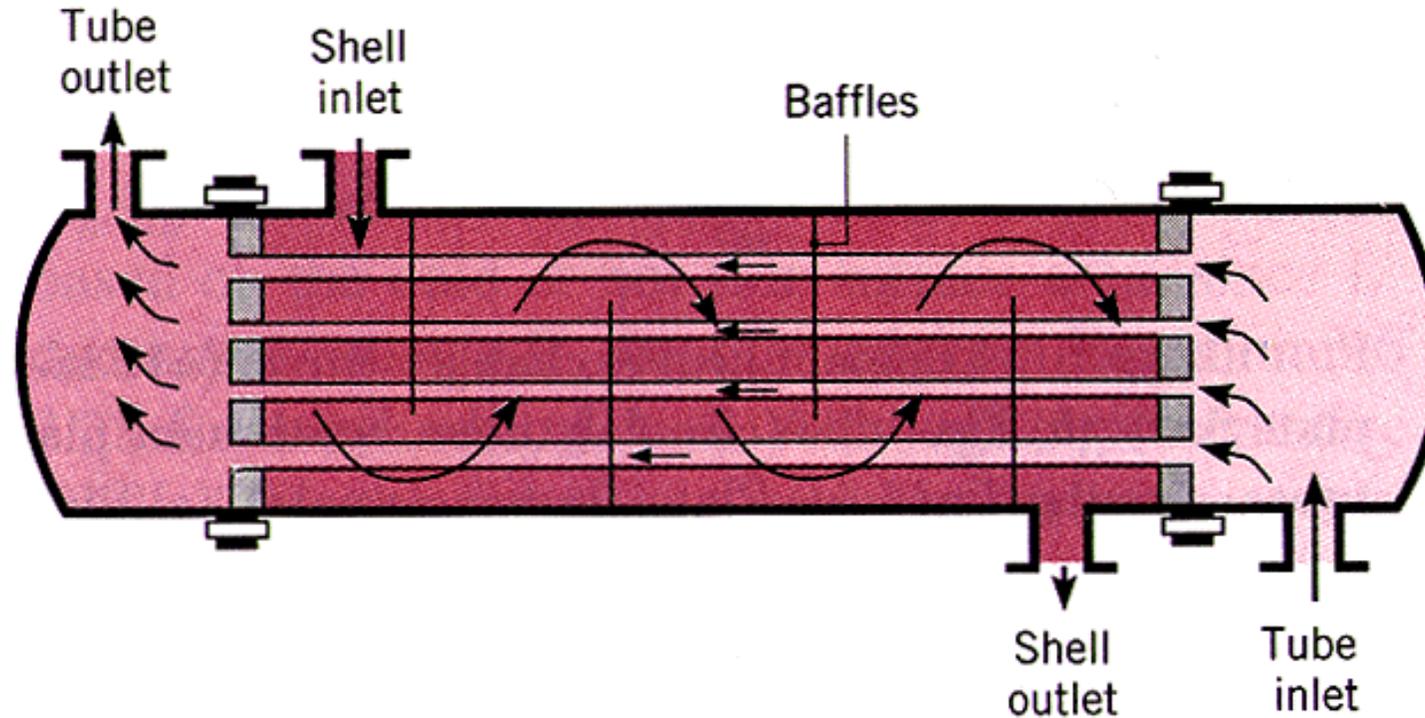
- Autres types d'échangeurs



Échangeurs à courant transversal: a) avec ailettes; b) sans ailettes

Types d'échangeurs

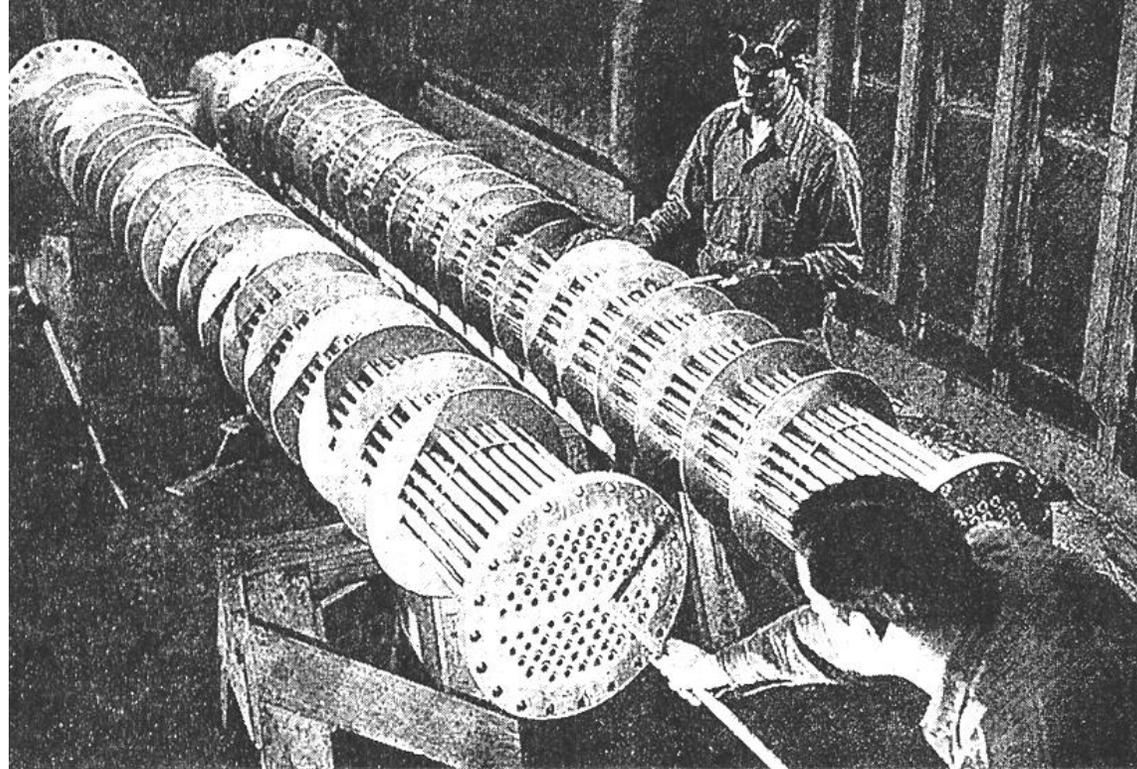
- Autres types d'échangeurs



Échangeurs à coque et tubes: une passe côté coque et une passe côté tubes

Types d'échangeurs

- Échangeur à coque et tubes

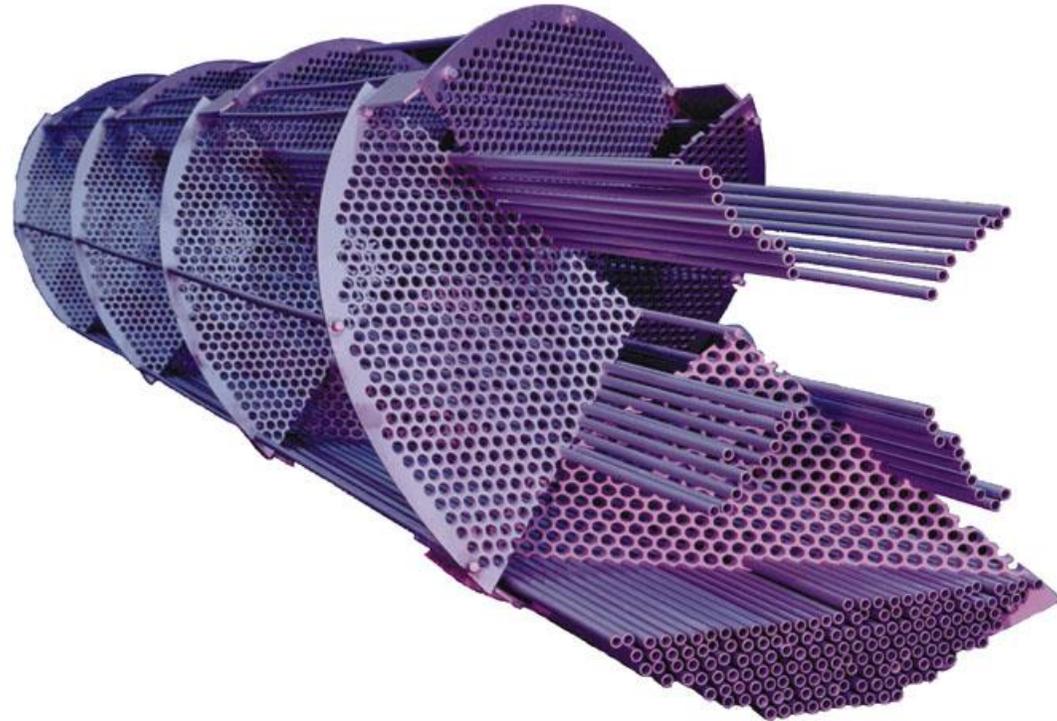


Tube-Bundle (1967)

Aluminium Company of America, USA

Types d'échangeurs

- Échangeur à coque et tubes

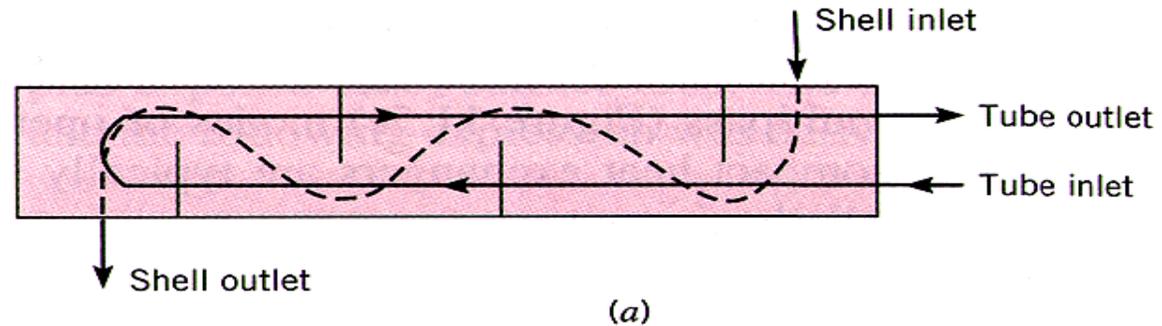


HELIXCHANGER™ Tube-Bundle in Fabrication (2001)
ABB LUMUS BV, The Netherlands

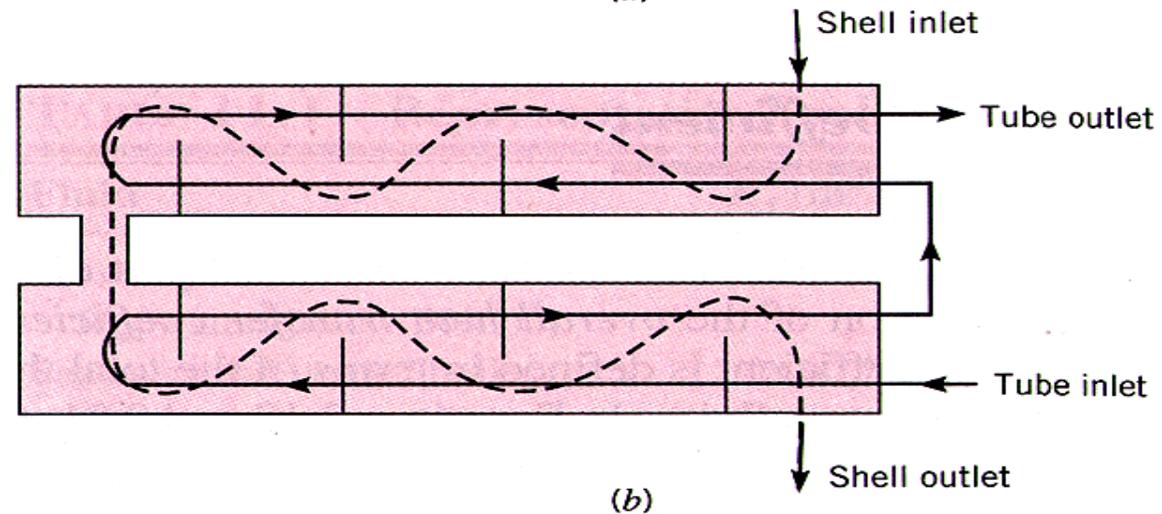
Types d'échangeurs

- Autres types d'échangeurs

1 passe coque,
2 passes tube

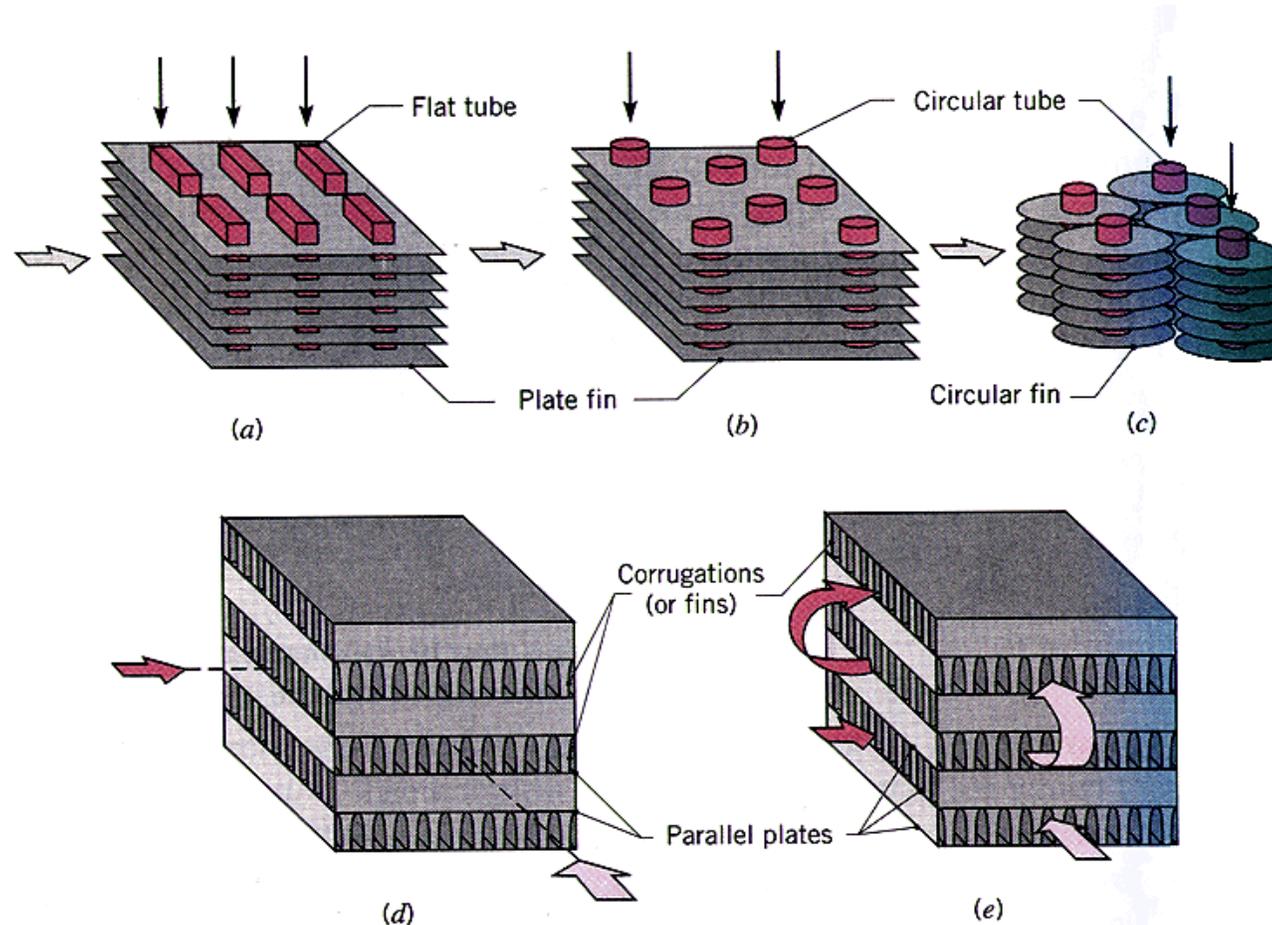


2 passes coque,
4 passes tube



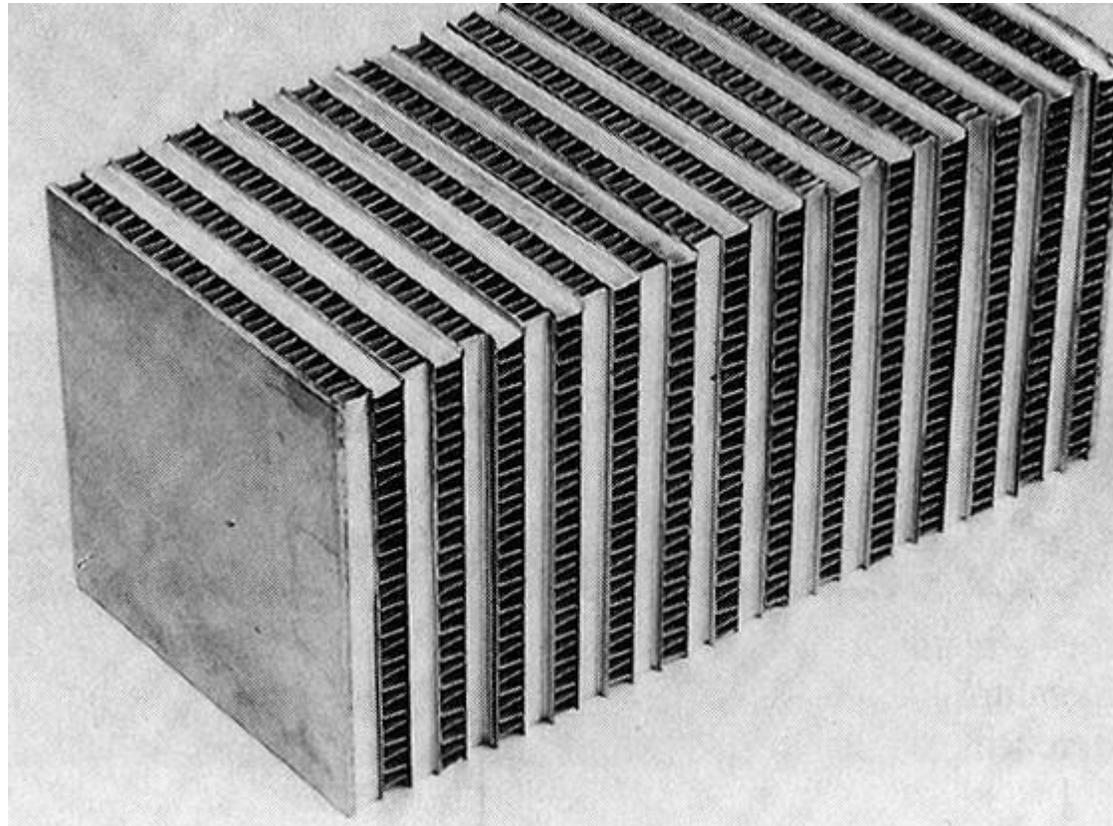
Types d'échangeurs

- Échangeurs compacts: a,b,c) tubes-aillettes; d,e) plaques-aillettes



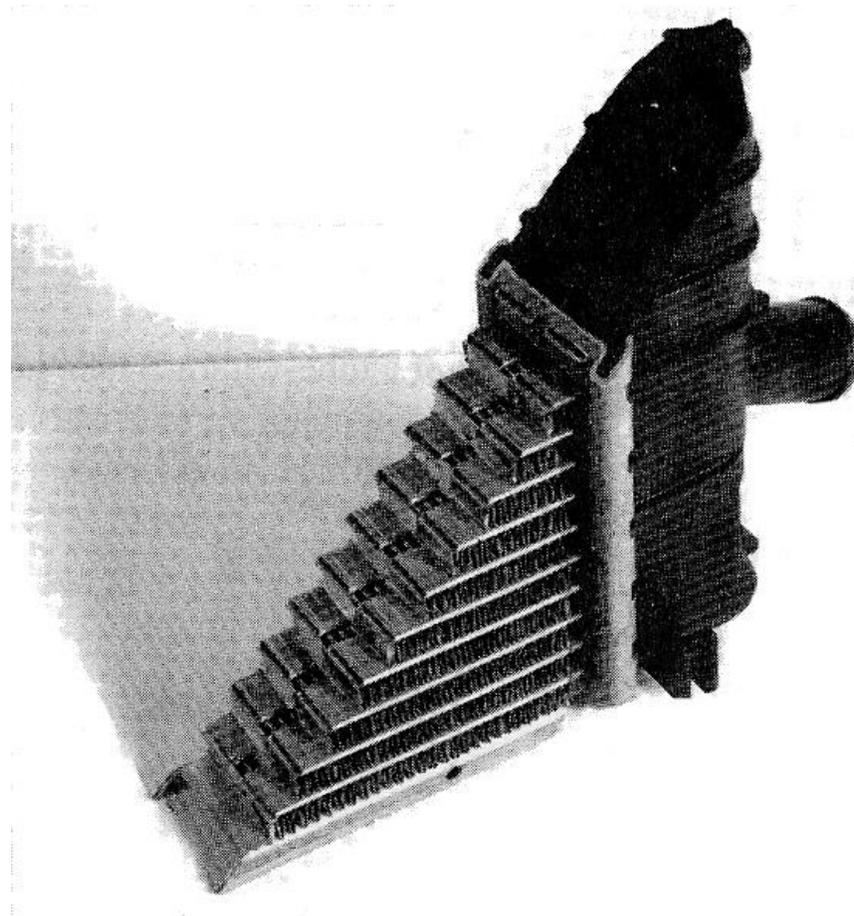
Types d'échangeurs

- Cœur d'un échangeur à plaques et courants croisés en aluminium, AKG America Corp.



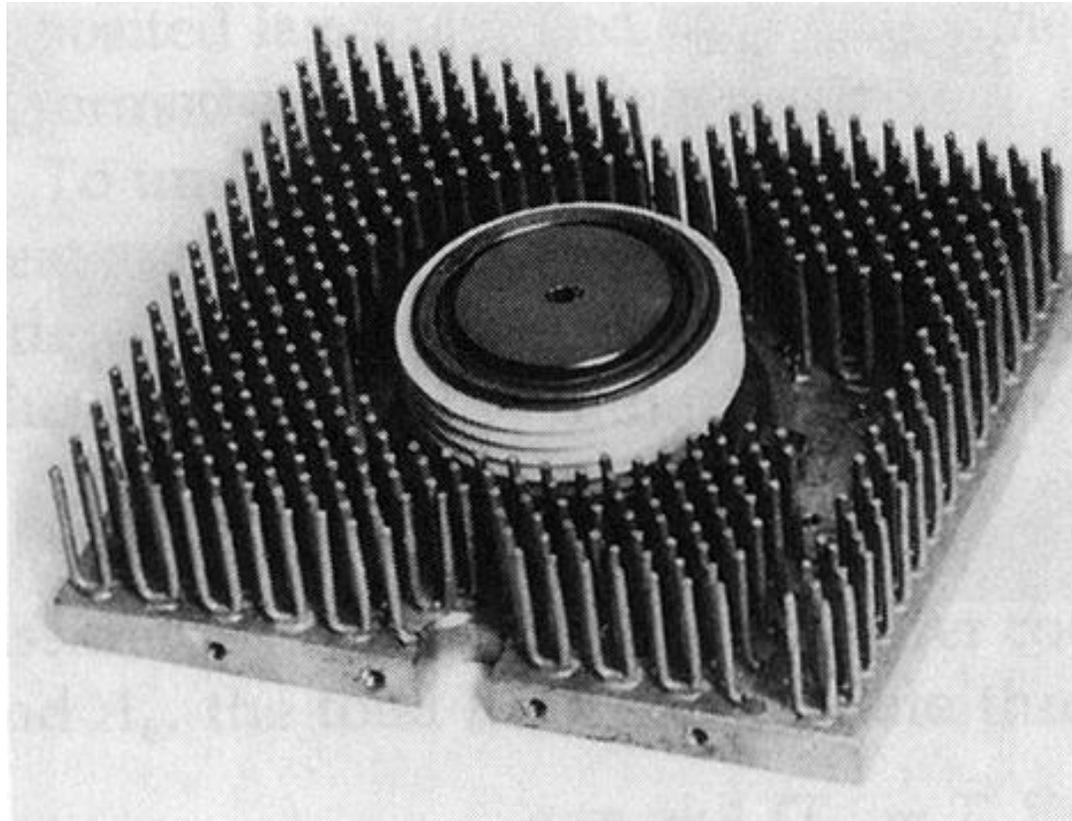
Types d'échangeurs

- Détail d'un échangeur à courants-croisés



Types d'échangeurs

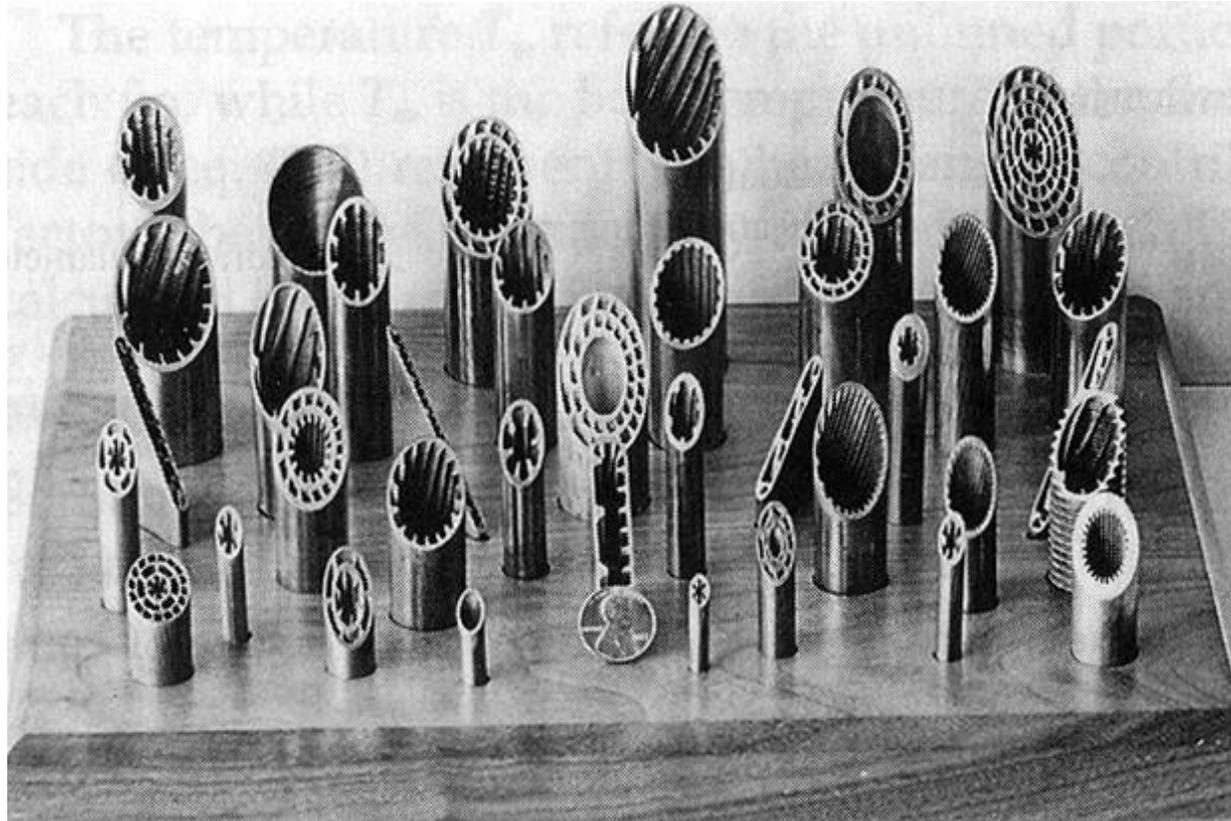
- Échangeur avec surface comportant des ailettes



General Motors Corp., Lockport, NY

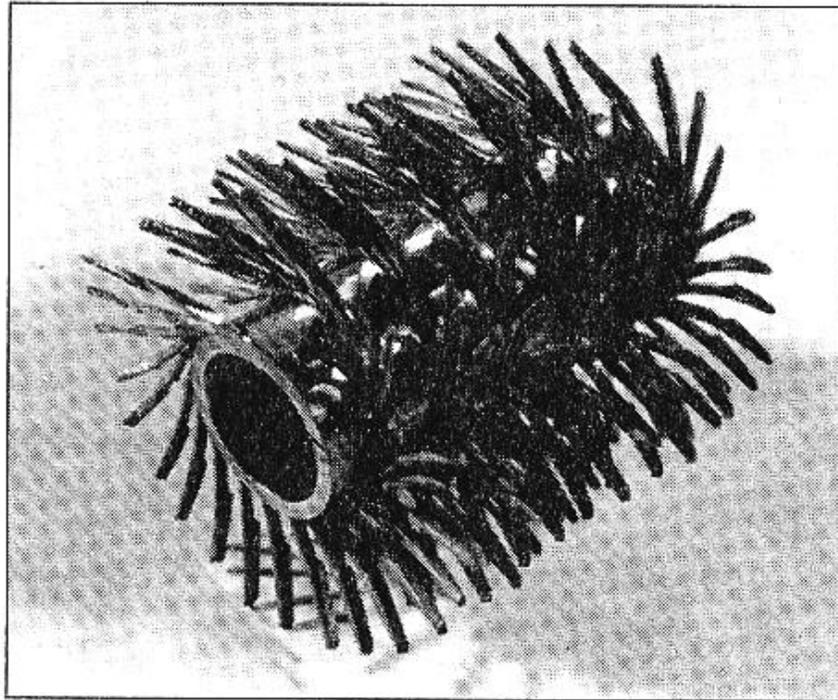
Types d'échangeurs

- Ailettes disposées à l'intérieur des tubes pour augmenter le transfert thermique

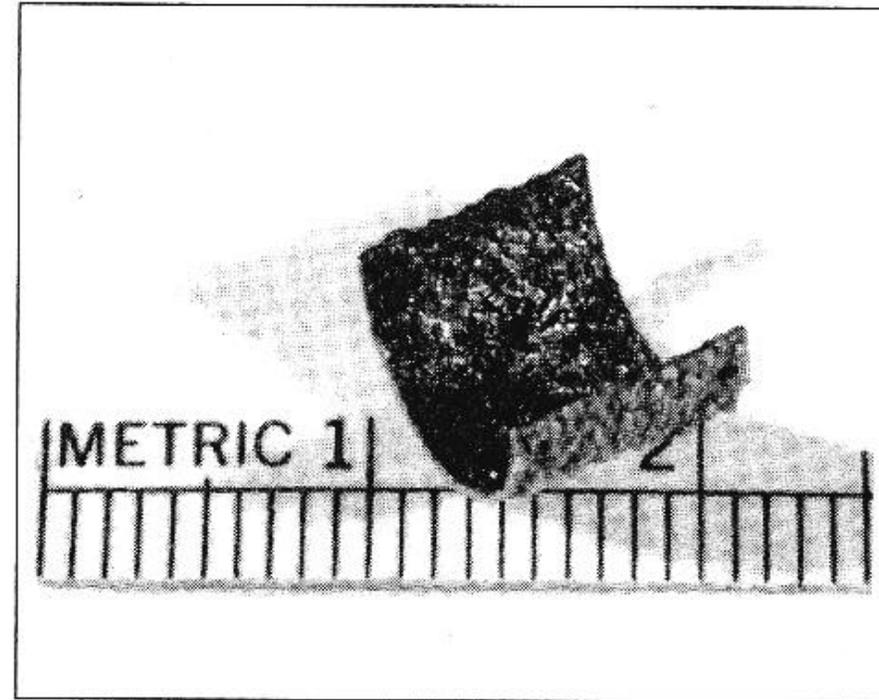


Types d'échangeurs

- Autres dispositifs pour augmenter le transfert thermique



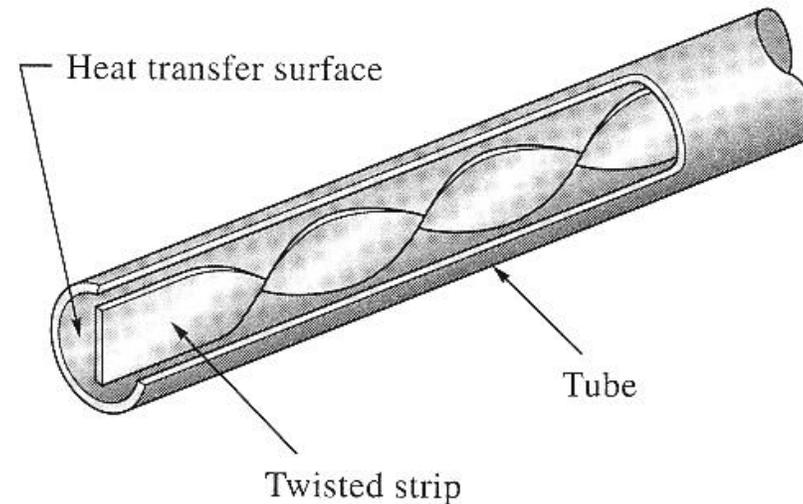
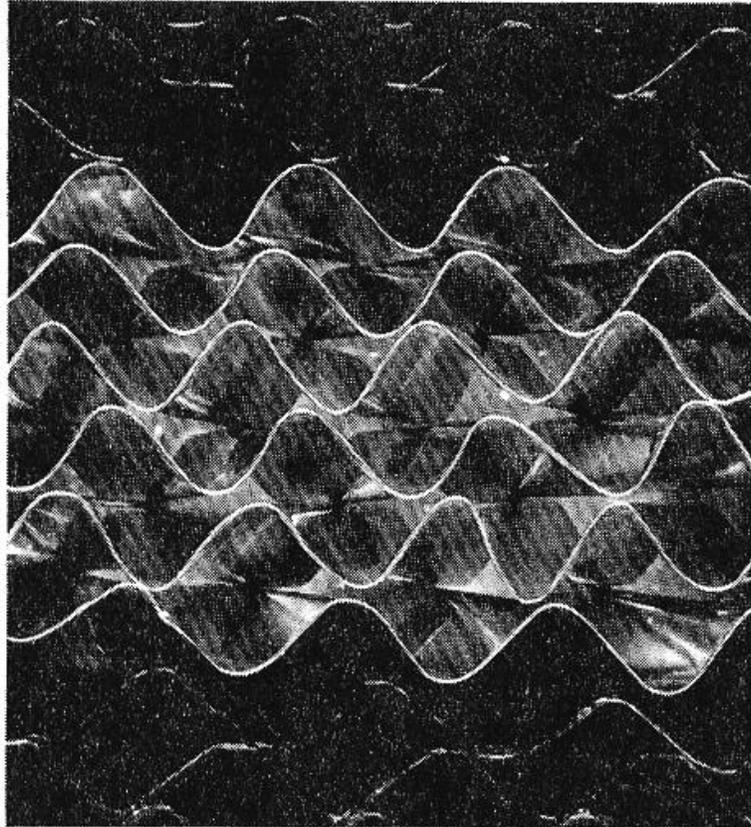
(a)



(b)

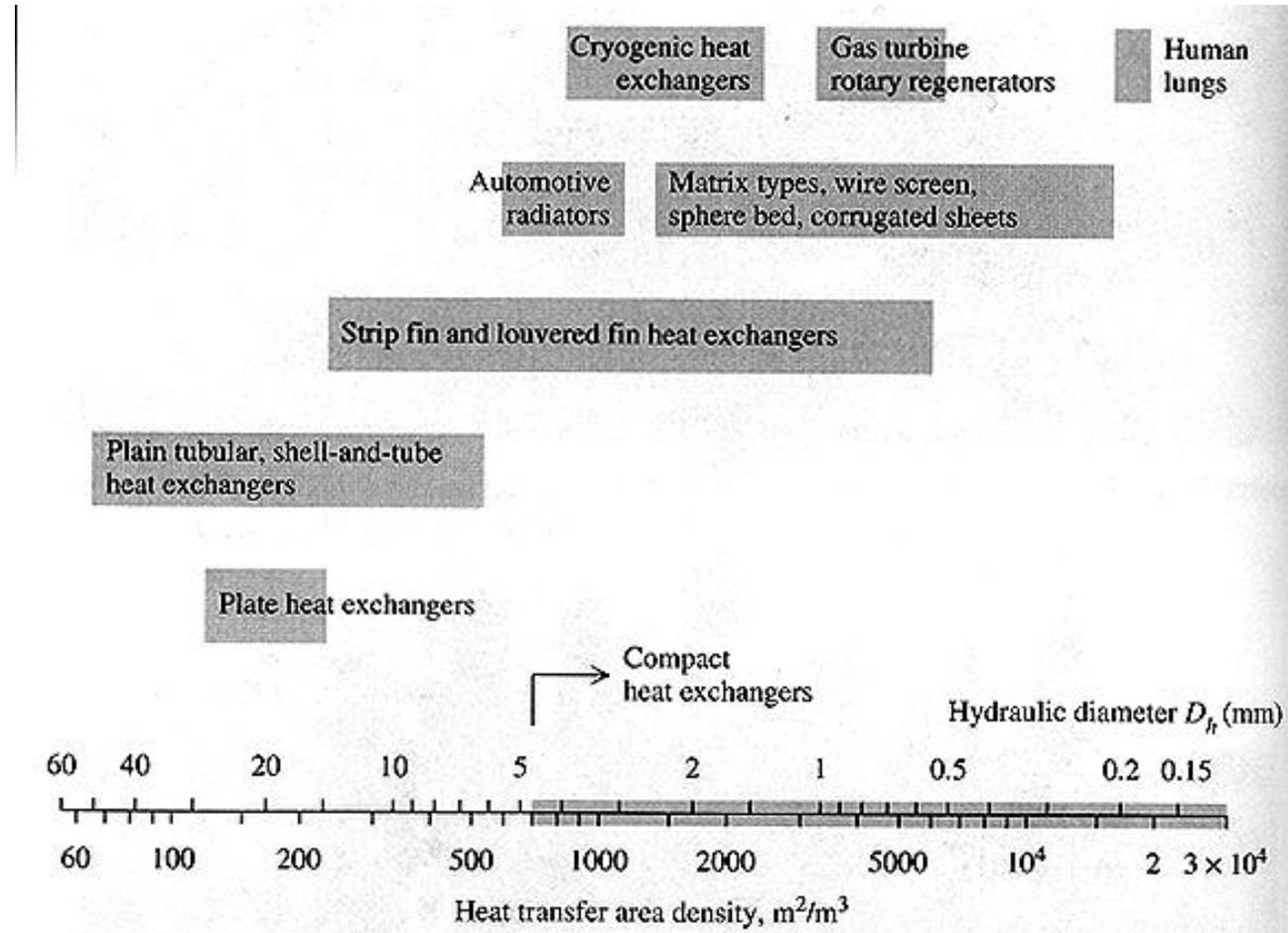
Types d'échangeurs

- Autres dispositifs pour augmenter le transfert thermique



Types d'échangeurs

- Compacité des échangeurs de chaleur



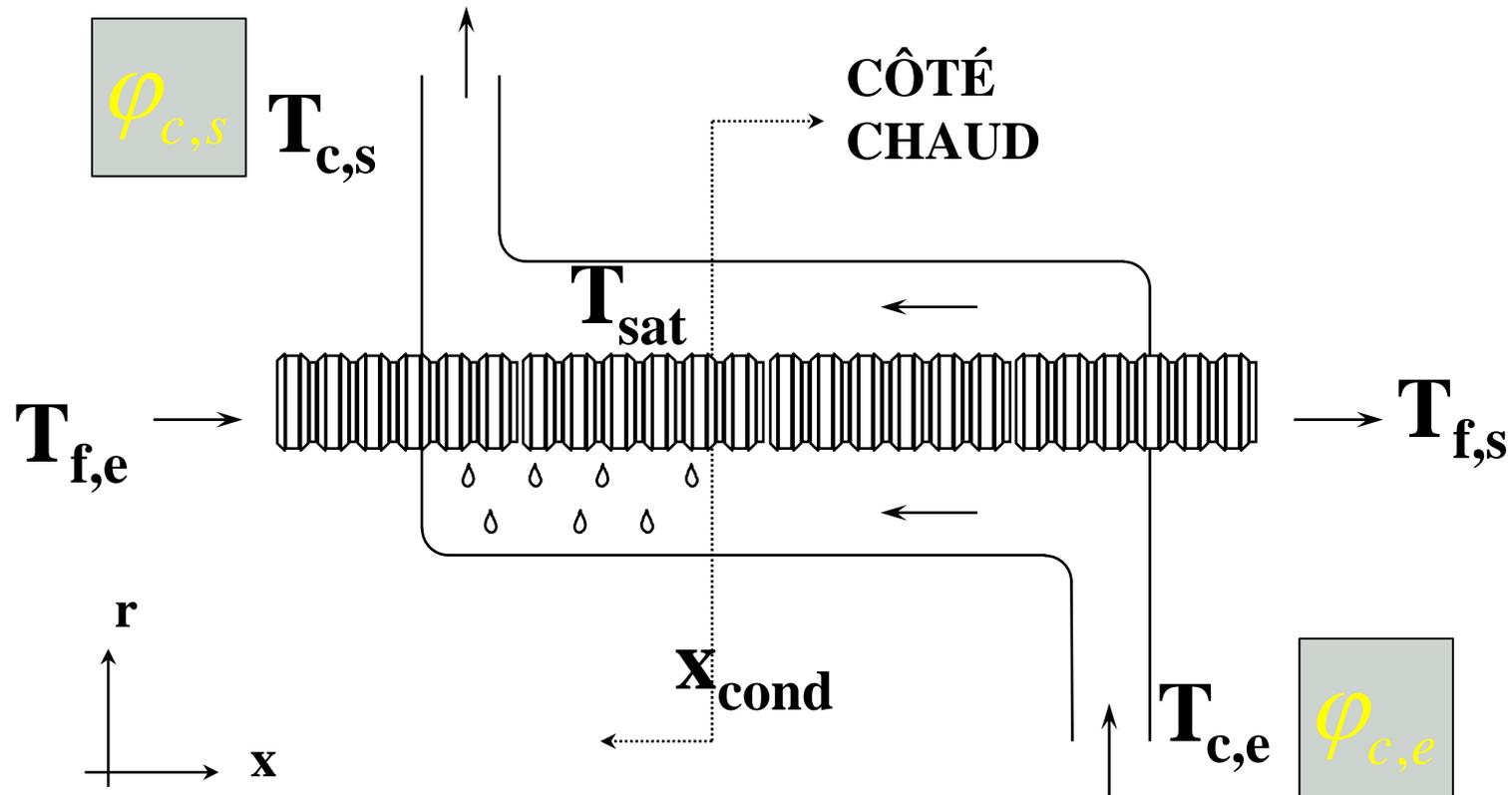
Types d'échangeurs

- Échangeur contre-courant, 2000 (labo)



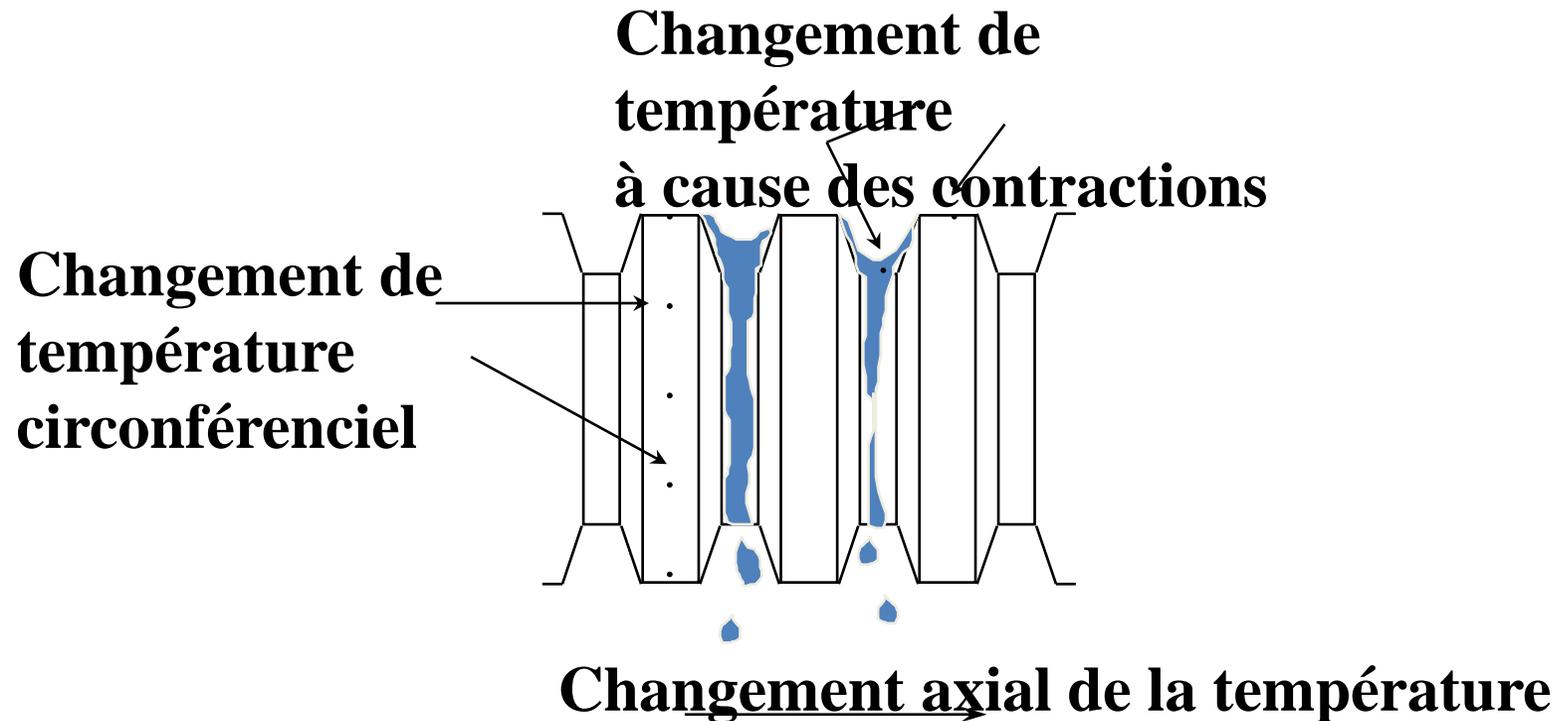
Types d'échangeurs

- Échangeur contre-courant, 1996 (principe)



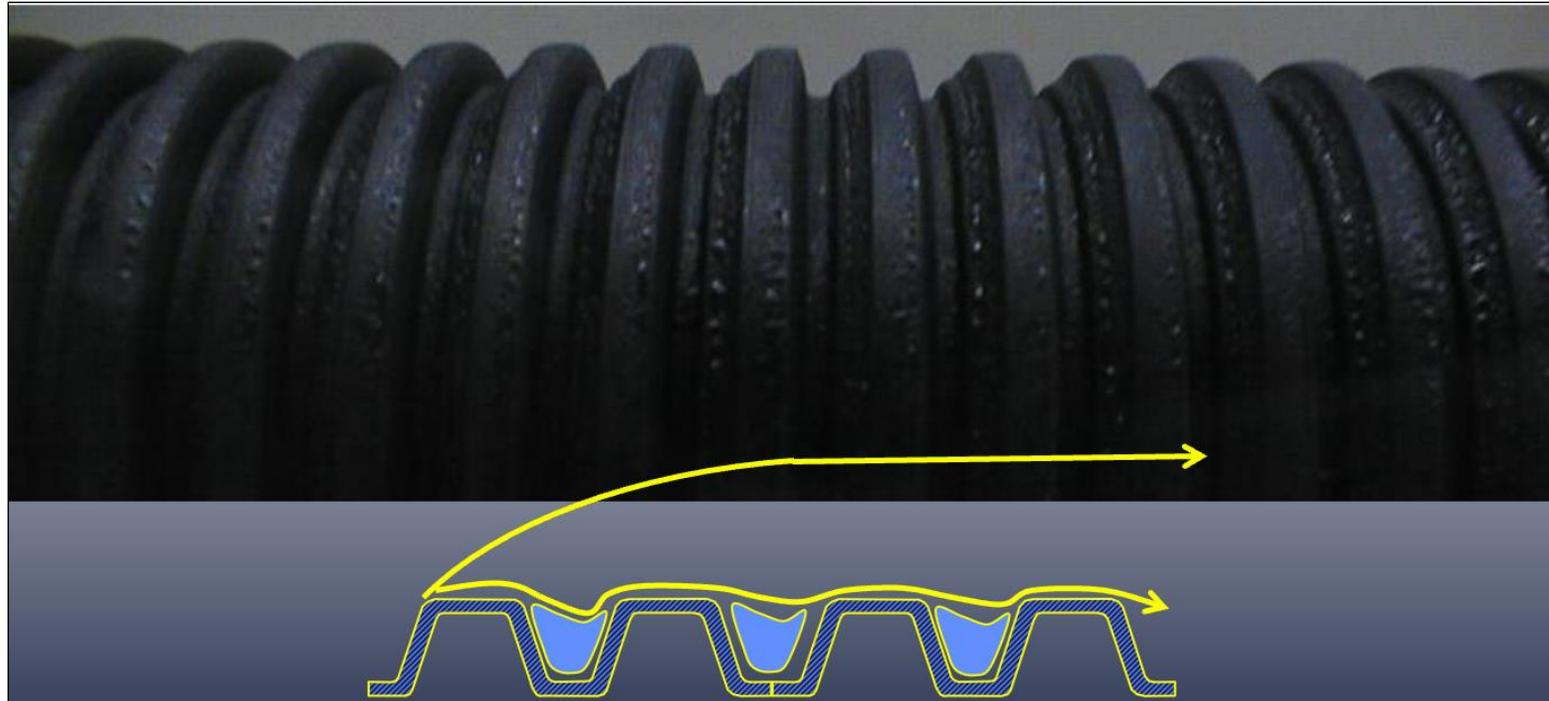
Types d'échangeurs

- Échangeur thermique imputable à la condensation



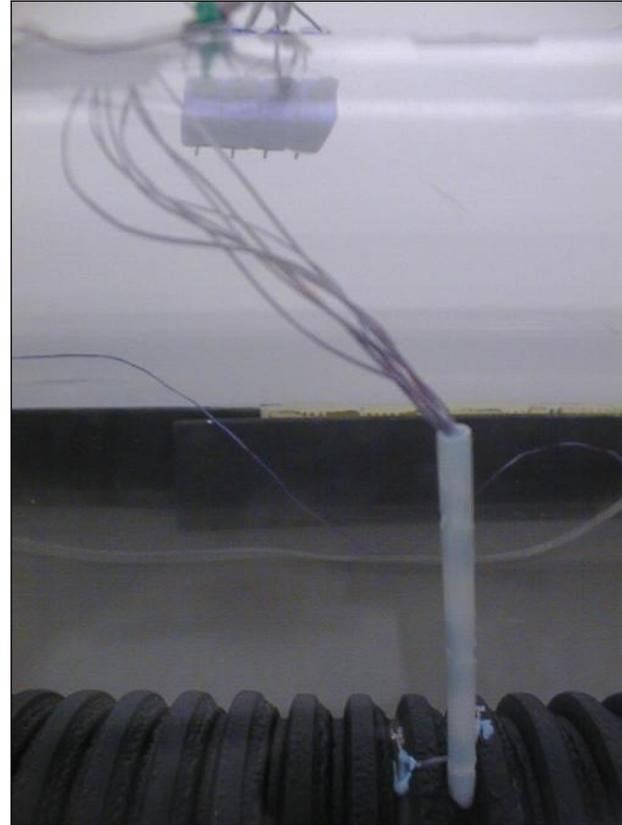
Types d'échangeurs

- Chaleur latente transférée



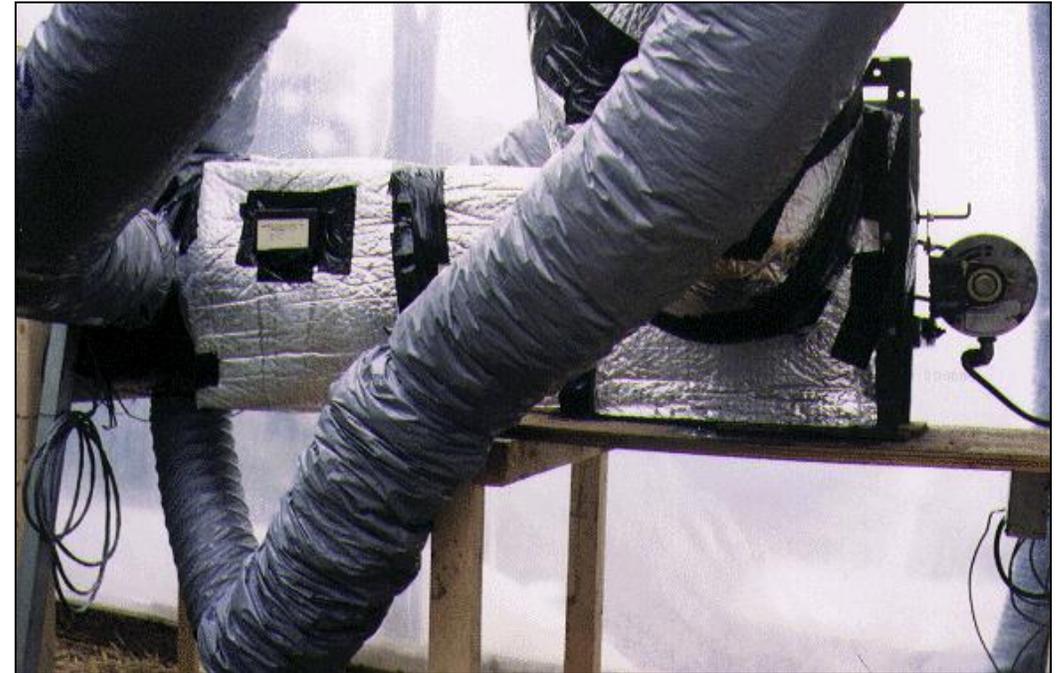
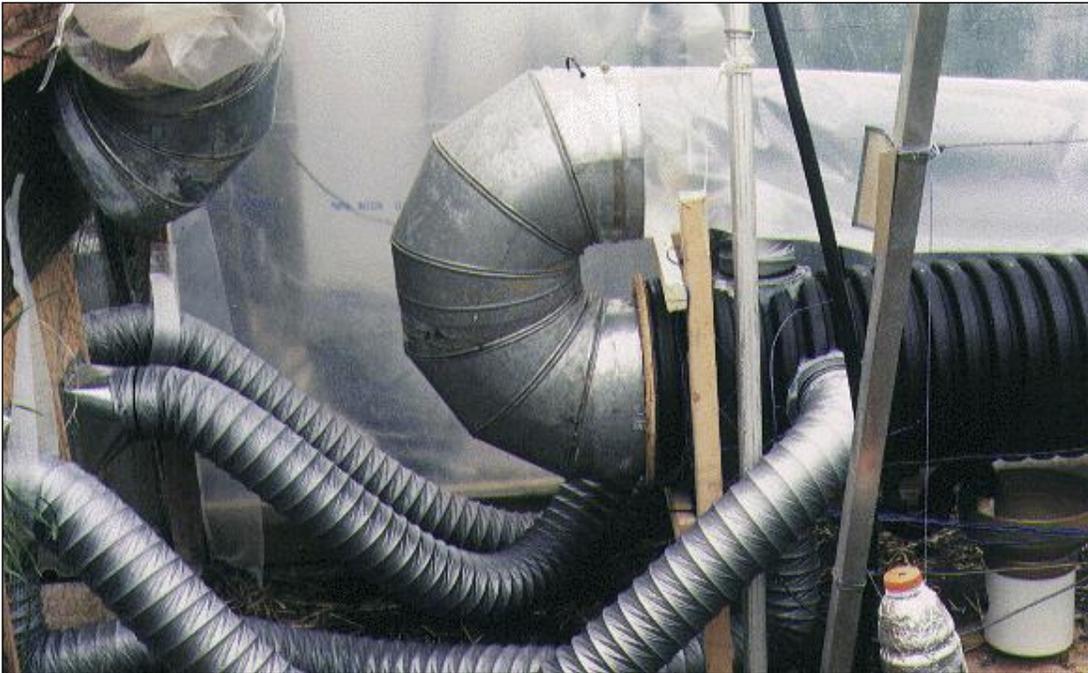
Types d'échangeurs

- Prototype de laboratoire, 2000



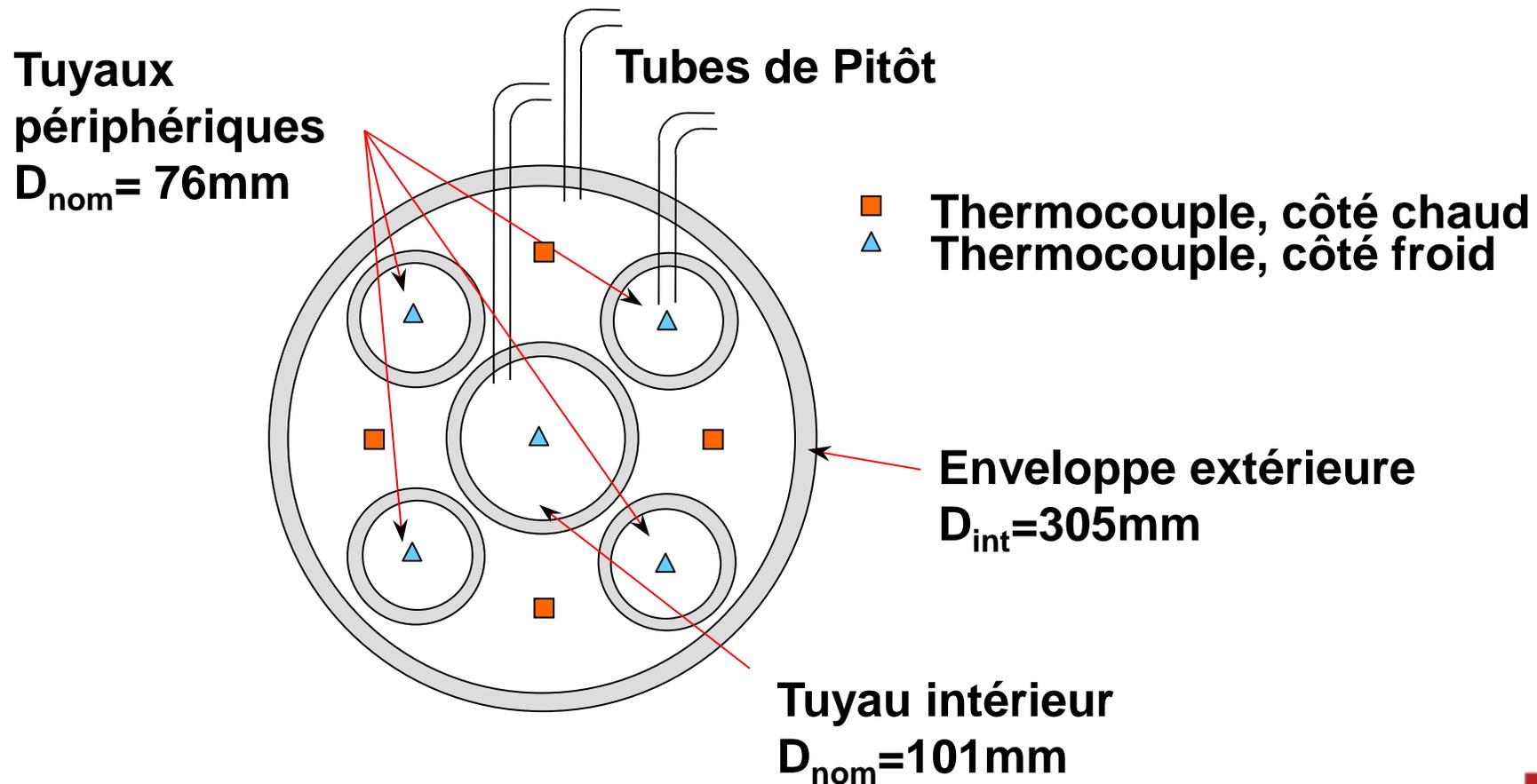
Types d'échangeurs (PlasteXchanger)

- Modèle original pour la serriculture, 1996



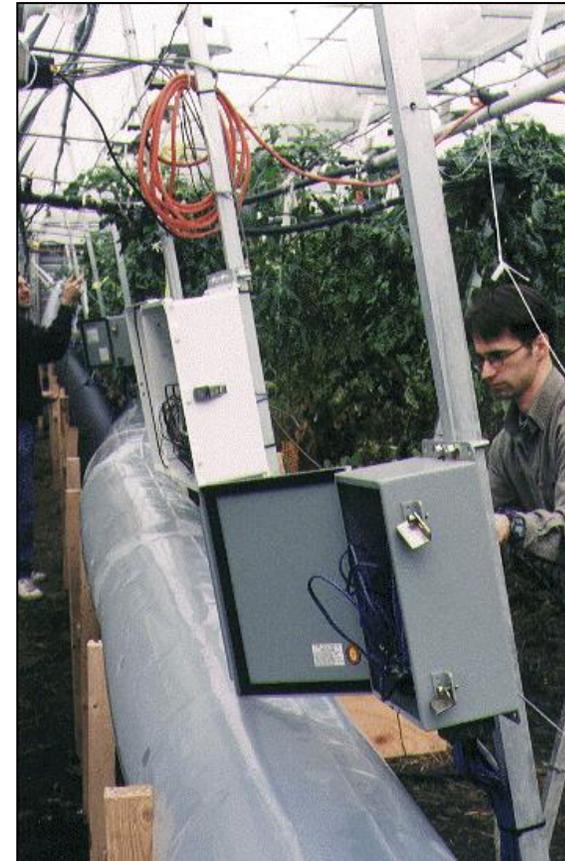
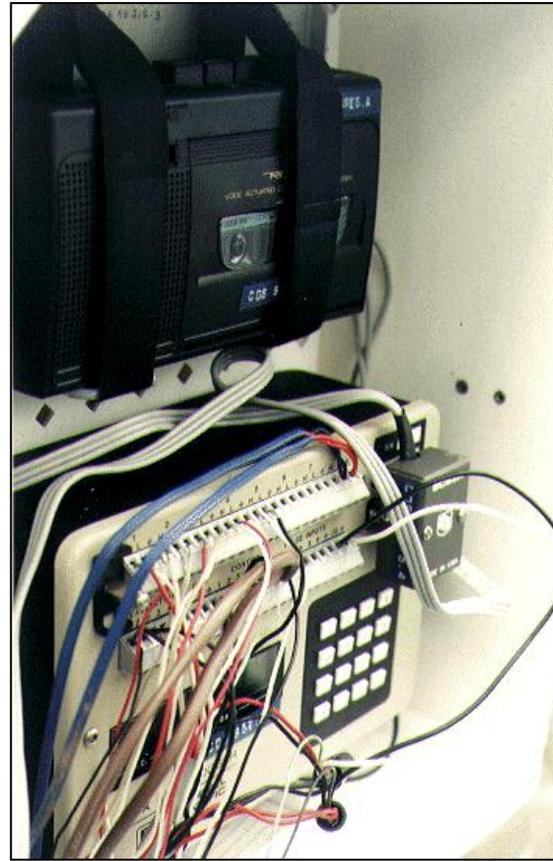
Types d'échangeurs (PlasteXchanger)

- Modèle original (vue de coupe)



Types d'échangeurs

- Modèle original pour la serriculture, 1996



Types d'échangeurs

- Modèle pour aviculture, 1998



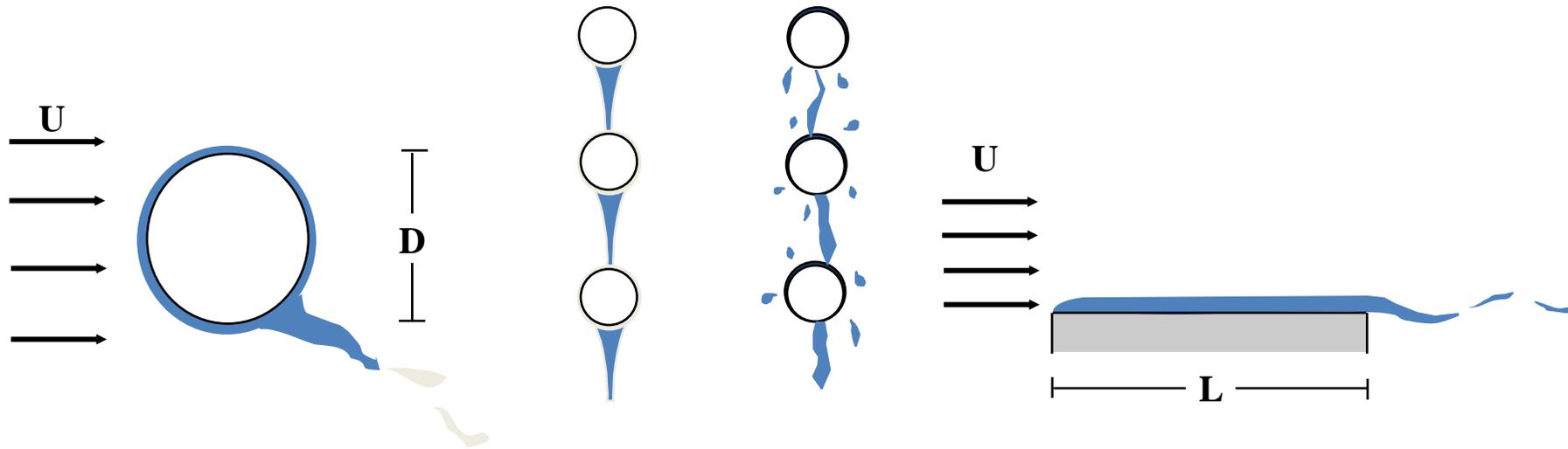
Types d'échangeurs (PlasteXchanger)

- Modèle pour aviculture, 1998



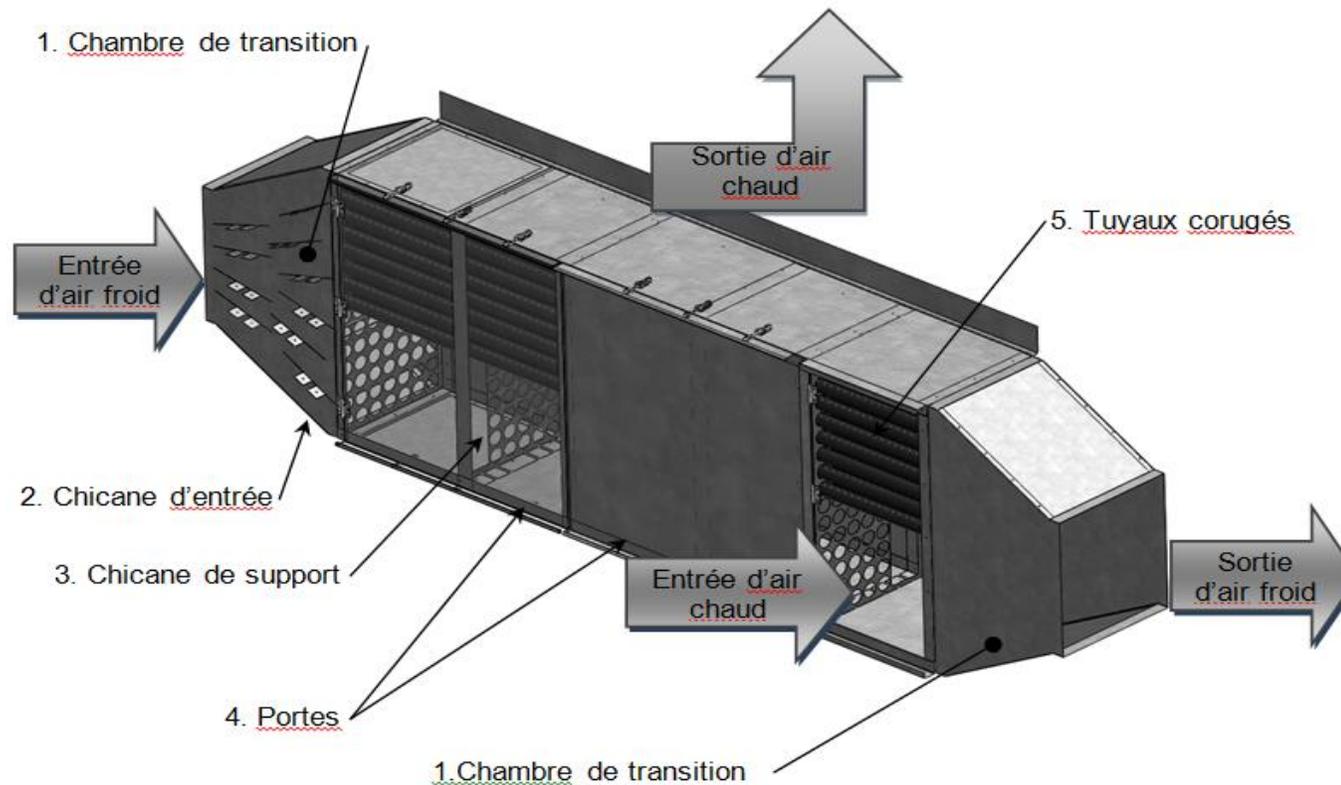
Types d'échangeurs

- Modèle pour aviculture
 - Les chicanes favorisent le transfert thermique



Types d'échangeurs

- Modèle pour milieux hostiles (ESA, ESAir 1, 2012)



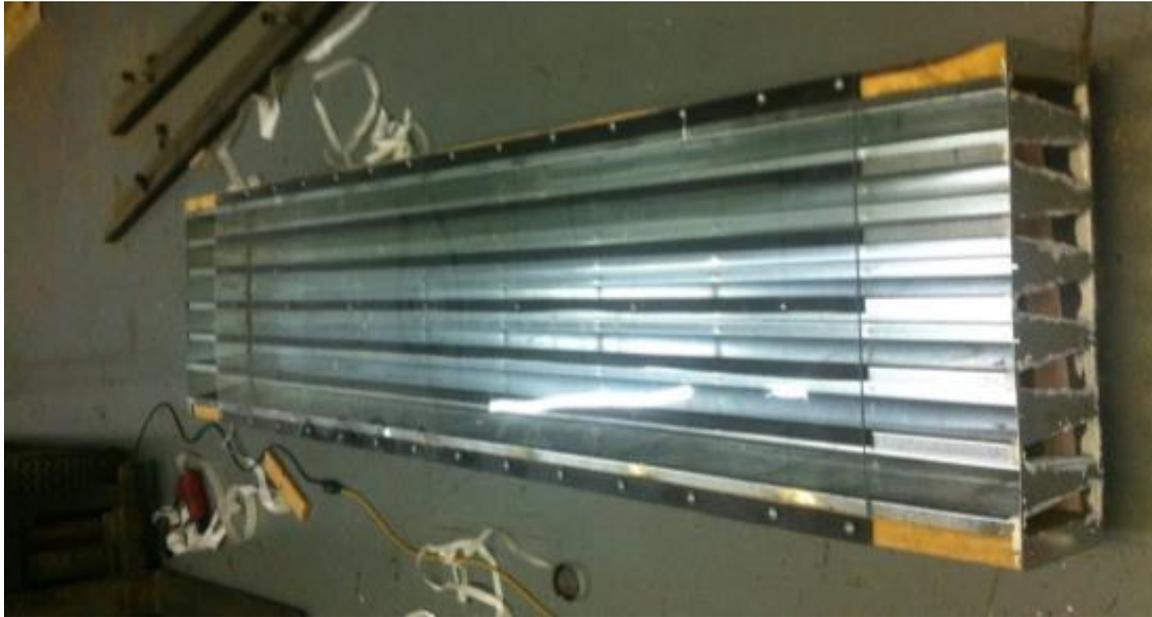
Types d'échangeurs

- Modèle pour milieux hostiles (ESA, ESAir 1, 2013)



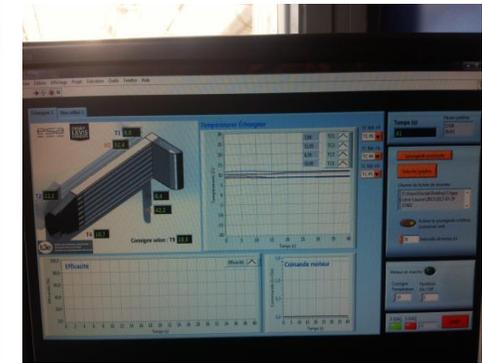
Types d'échangeurs

- Modèle pour milieux hostiles (ESA, ESAir 2, 2014)



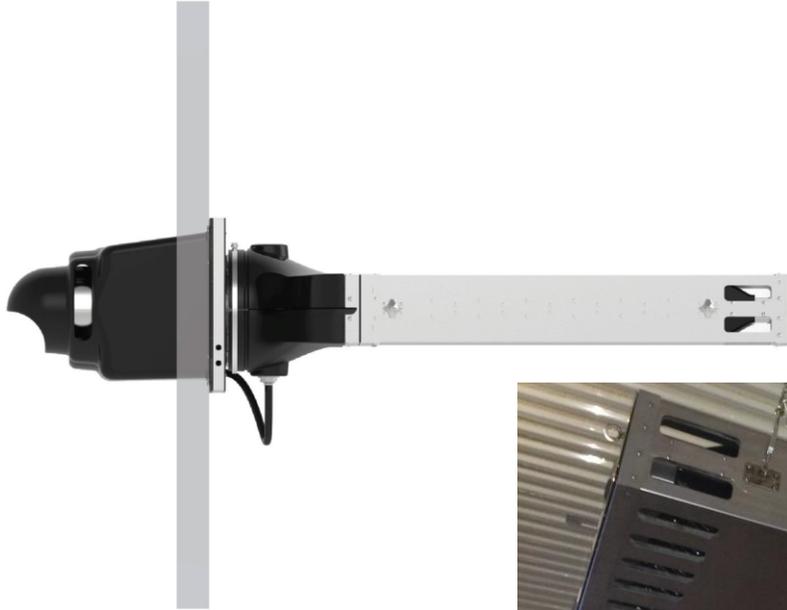
Types d'échangeurs

- Modèle pour milieux hostiles (ESA, ESAir 3, 2015)



Types d'échangeurs

- Modèle pour milieux hostiles (ESA, ESA800, 2016)



50 unités vendues au Québec

Types d'échangeurs

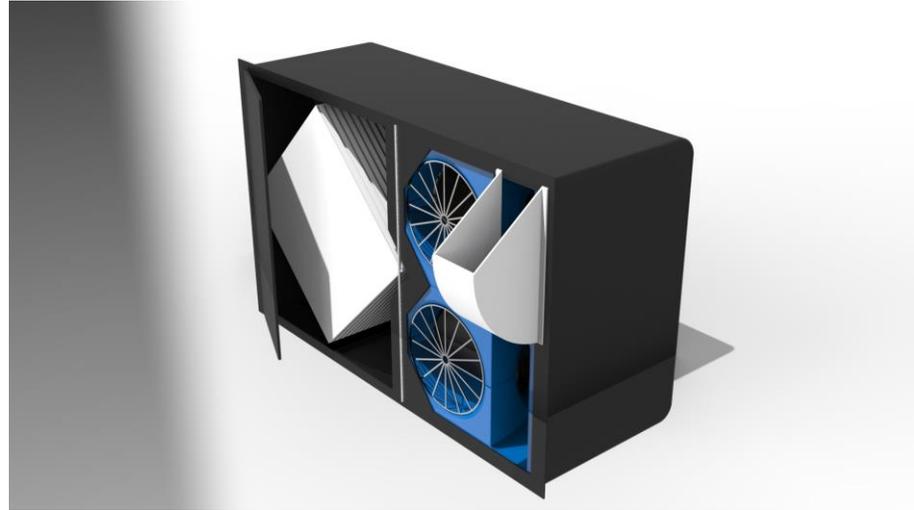
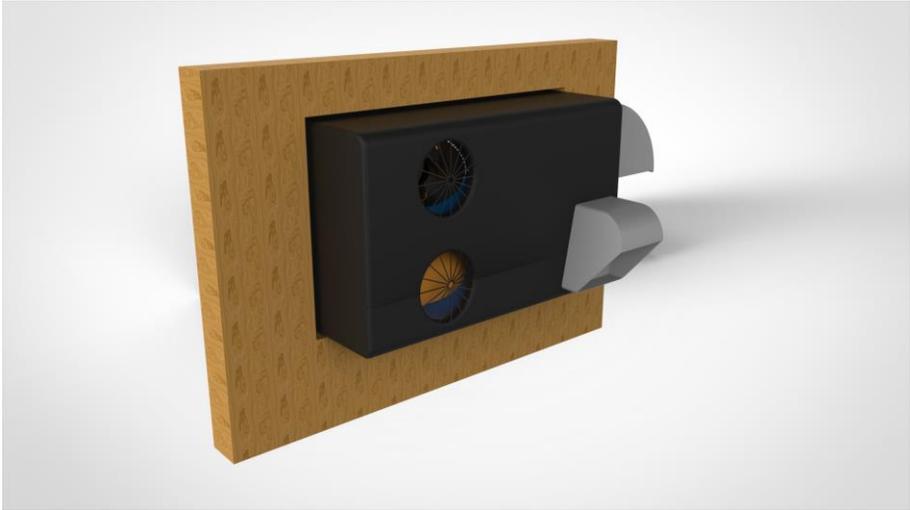
- Modèle pour milieux hostiles (ESA, ESA1000, 2018)



1000 unités vendues au Canada (5 provinces et Yukon) et aux USA (5 états)

Types d'échangeurs

- Modèle pour milieux hostiles (ESA, ESA3000, 2021)



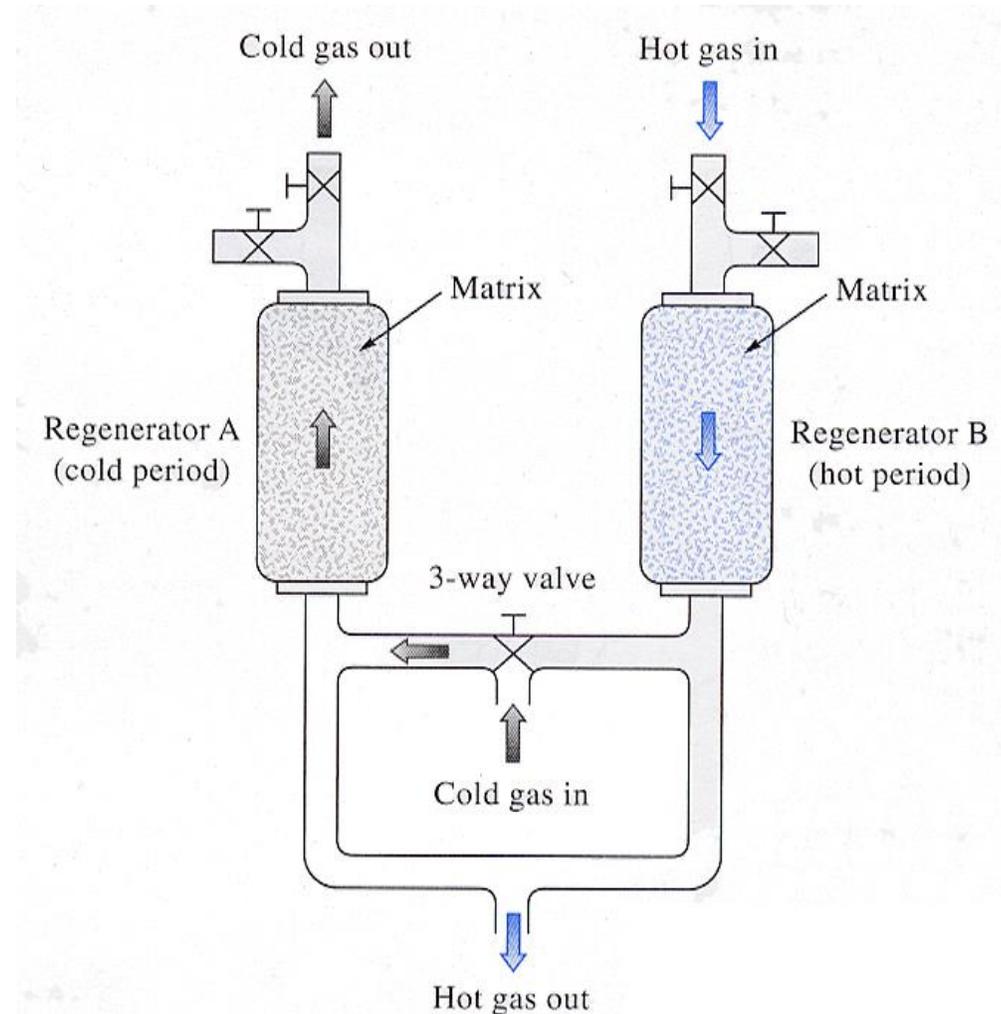
300 unités vendues (pré-vente) au Canada (5 provinces et Yukon) et aux USA (5 états)

Types d'échangeurs

- Classes d'échangeurs de chaleur non étudiés dans ce cours
 - Les échangeurs de chaleur par rayonnement;
 - Devenus d'actualité à l'occasion de l'étude de l'évacuation ou de la captation d'énergie radiante dans les satellites et engins spatiaux.
 - Les régénérateurs de chaleur;
 - Un gaz chaud balaie un empilage de réfractaires pendant une première période puis est remplacé par un gaz froid qui s'approprie la chaleur cédée à l'empilage par le gaz chaud.
 - Les échangeurs de chaleur avec mélange;
 - Les condenseurs à jet et les tours de refroidissement.

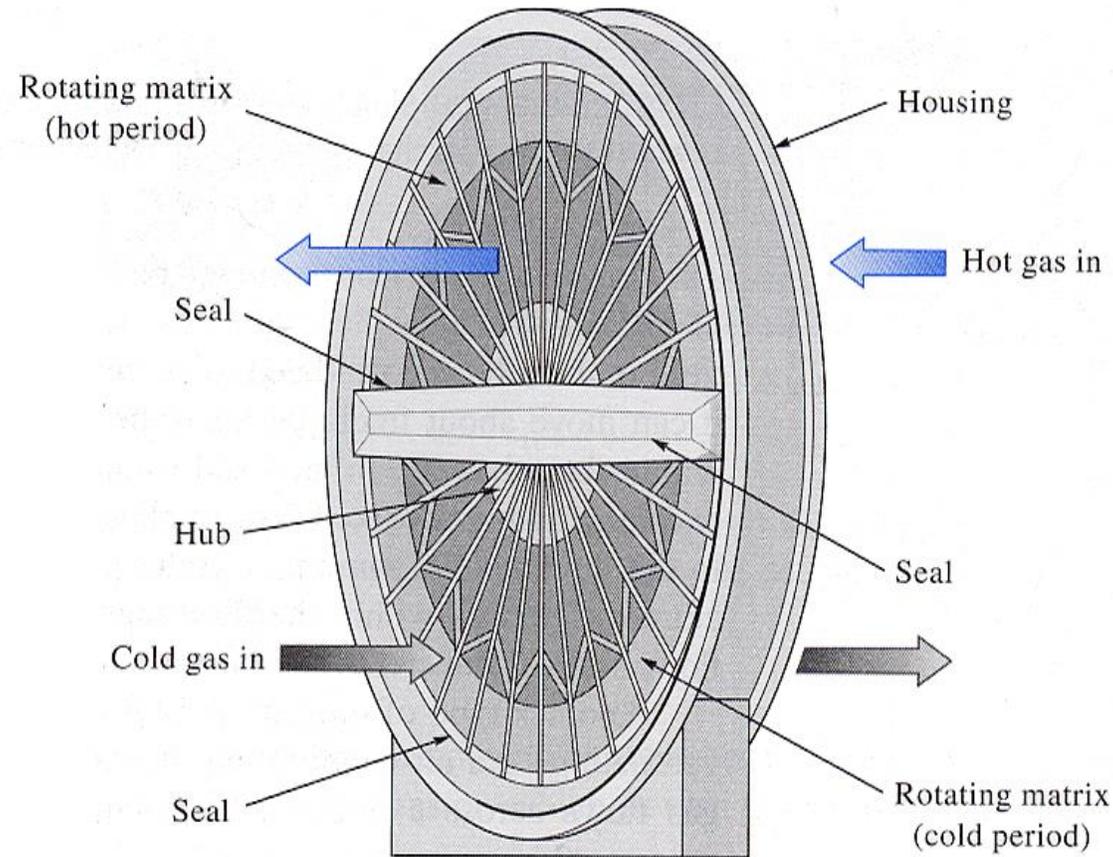
Types d'échangeurs

- Régénérateurs



Types d'échangeurs

- Régénérateurs



Fin de la partie 1

Merci de votre attention !



Prenez une pause de quelques minutes avant de poursuivre avec la partie 2

Plan de la présentation

- Introduction et objectifs de la capsule
- Types d'échangeurs
- ***Méthodologie de calcul***
- Coefficient de transfert thermique global
- Analyse : différence de température logarithmique moyenne (LMTD)
- Analyse : Méthode NUT (NTU)
- Hydrodynamique
- Échangeurs compacts
- Conclusion

Méthodologie de calcul

- Techniquement, vous pourrez être confrontés à deux types de problèmes différents

Cas 1 – Calcul de performance (*rating*)

- Cas où l'échangeur existe
 - Sa taille et son type sont spécifiés
 - Le débit et la température aux entrées sont connus
 - L'objectif consiste alors à déterminer:
 - Les températures de sortie;
 - Les pertes de charge;
 - Le transfert thermique.

Méthodologie de calcul

Cas 2 – Calcul de dimensionnement (*Sizing*)

– Cas où l'échangeur est à dimensionner

- Les débits des fluides chauds et froids et leurs températures sont connus à l'entrée et à la sortie
- Les pertes de charges admissibles sont connues
- L'objectif consiste alors à déterminer:
 - La surface d'échange requise
 - La géométrie appropriée
 - En fonction d'un type d'échangeur;
 - En fonction du coût, de la masse et de l'encombrement.

Méthodologie de calcul

Hypothèses générales

- On considère que:
 - Les fluides chaud et froid ne subissent pas de changement de phase pendant le processus d'échange;
 - Les débits des fluides sont constants (régime permanent);
 - Il n'y a pas de déperdition de chaleur vers le milieu ambiant (enveloppe externe isolée)
 - Il n'y a pas de conduction longitudinale dans les tubes;
 - Dans toute section, chaque fluide est caractérisé par une seule température;
 - Le coefficient global de transfert de chaleur est uniforme de même que les chaleurs spécifiques.

Méthodologie de calcul

Approches de résolution

- Dans ce cours, deux approches de résolution de problèmes sont présentées:
 - La méthode L.M.T.D (*Log Mean Temperature Difference*)
 - DTLM (Différence de Température Logarithmique Moyenne)
 - Plus facile pour les cas de type 2, design (*sizing*)
 - Difficile lorsque l'échangeur existe.
 - La méthode N.T.U (*Number of Transfer Unit*)
 - NUT (Nombre d'Unités de Transfert)
 - Facile à employer pour les cas de type 1, calcul de performance (*rating*).

Plan de la présentation

- Introduction et objectifs de la capsule
- Types d'échangeurs
- Méthodologie de calcul
- ***Coefficient de transfert thermique global***
- Analyse : différence de température logarithmique moyenne (LMTD)
- Analyse : Méthode NUT (NTU)
- Hydrodynamique
- Échangeurs compacts
- Conclusion

Coefficient de transfert global

- La détermination du coefficient global de transfert de chaleur U est essentielle dans le calcul des échangeurs de chaleur
- U est l'inverse de la résistance thermique totale au transfert de chaleur entre deux fluides:

$$q = U A \Delta T$$

où q : quantité de chaleur échangée

U : coefficient global de transfert

A : surface d'échange

ΔT : différence de températures entre les deux fluides

Coefficient de transfert global

- Il importe de spécifier pour quelles conditions d'opération le coefficient U est calculé.
 - La surface était-elle propre?
 - Des impuretés se déposent, de la rouille se forme.
 - Cette situation est prévue en tenant compte d'un facteur d'encrassement corrélé sous forme de résistance thermique.
 - Y a-t-il des ailettes?
 - Les ailettes réduisent la résistance thermique.

Coefficient de transfert global

- La résistance thermique globale à l'échange est donc:

$$\frac{1}{UA} = \frac{1}{U_f A_f} = \frac{1}{U_c A_c}$$

- Globalement:

$$\frac{1}{UA} = \frac{1}{(\eta_T h A)_i} + \frac{R_{f,i}''}{(\eta_T A)_i} + \frac{\ln\left(\frac{D_e}{D_i}\right)}{2\pi k_p L} + \frac{R_{f,e}''}{(\eta_T A)_e} + \frac{1}{(\eta_T h A)_e}$$

–Où η_T est le rendement total $R_{f,e}''$ de la surface et $R_{f,i}''$ et $R_{f,e}''$ représentent les résistances imputables à l'encrassement.

Dans les cours Énergie et Énergies renouvelables, aucun calcul de rendement des ailettes n'est au programme.

Coefficient de transfert global

- Efficacité de l'ailette: Comparaison avec la surface sans ailette

$$\varepsilon_f = \frac{q_{Ail}}{hA_b\theta_b} = 2?$$

- Rendement de l'ailette:
 - Comparaison avec l'échange idéal où toute l'ailette est à T_b
- Rendement total: $\eta_T = q_T/hA_T\theta_b$
 - Comparaison avec l'échange idéal où toutes les ailettes sont à T_b .
 - Il faut connaître la dimension des ailettes et leur disposition sur la surface où elles sont attachées.

Coefficient de transfert global

<i>Combinaisons des fluides</i>	<i>U (W/m² K)</i>
eau / eau	850 - 1700
eau / huile	110 - 350
condenseur à vapeur (eau dans tubes)	1000 - 6000
condenseur à alcool (eau dans tubes)	250 - 700
condenseur à ammoniac (eau dans tubes)	800 - 1400
échangeurs à tubulures, avec ailettes (eau dans tubes-air transversal)	25 - 50
échangeur air-air	5 - 25

Dans les cours Énergie et Énergies renouvelables, les calculs de coefficients de transfert global seront des plus simples.

Coefficient de transfert global

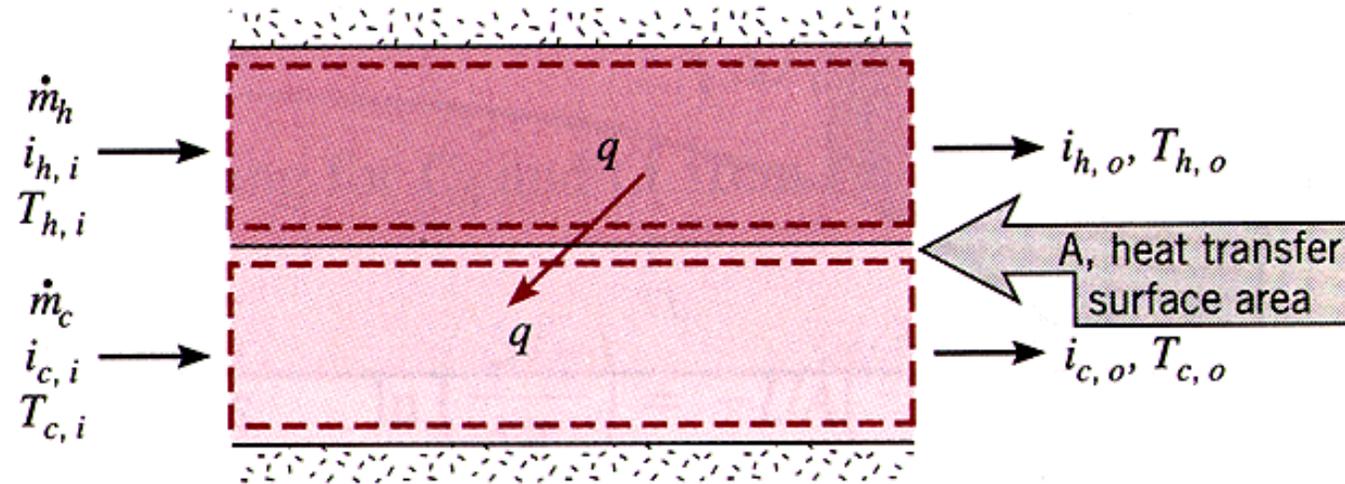
<i>Fluides</i>	<i>R''_f ($m^2 K/W$)</i>
eau de mer $T < 50^\circ\text{C}$	0.0001
eau de mer $T > 50^\circ\text{C}$	0.0002
eau douce $T < 50^\circ\text{C}$	0.0002 - 0.001
liquides réfrigérants	0.0002
vapeur d'eau (déshuilée)	0.0001

Plan de la présentation

- Introduction et objectifs de la capsule
- Types d'échangeurs
- Méthodologie de calcul
- Coefficient de transfert thermique global
- ***Analyse : différence de température logarithmique moyenne (LMTD)***
- Analyse : Méthode NUT (NTU)
- Hydrodynamique
- Échangeurs compacts
- Conclusion

Méthode LMTD

- Bilan d'énergie à travers une paroi



$$q = \dot{m}_c c_{p,c} (T_{m,c,e} - T_{m,c,s})$$

$$q = \dot{m}_f c_{p,f} (T_{m,f,s} - T_{m,f,e})$$

$$q = U A \Delta T$$

Méthode LMTD

- Qu'est ce que la LMTD?
 - C'est la différence de température adéquate (ΔT_{lm}) qui est utilisée dans l'expression du calcul de la quantité de chaleur échangée entre les deux fluides.
- Ce concept a-t-il déjà été introduit?
 - Oui, rappelez vous le cas de l'écoulement interne avec température du fluide imposée à l'extérieur de la conduite comme cas général de la surface à température constante connue. (Section 8.3.3)

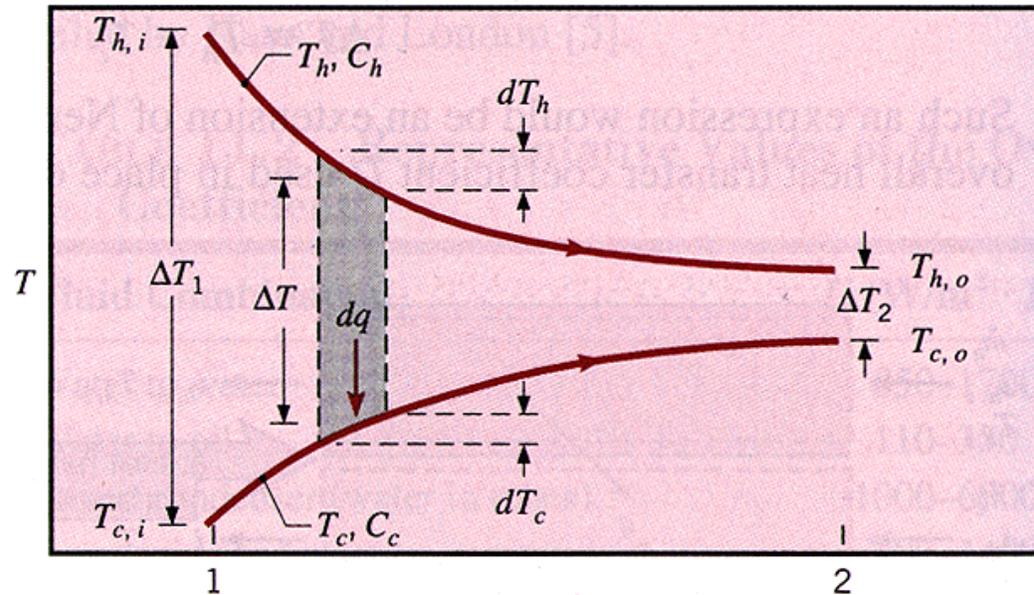
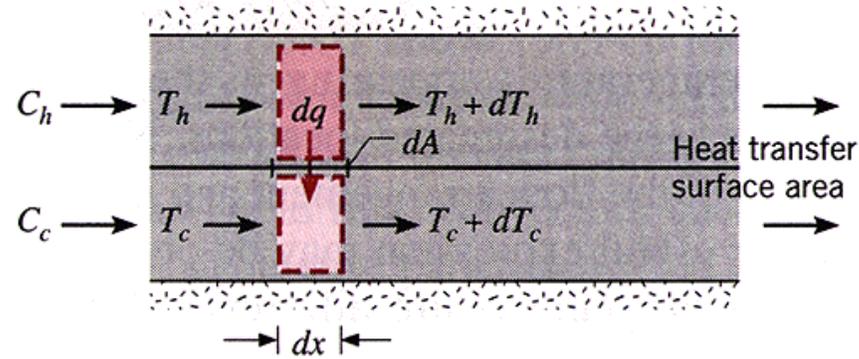
Méthode LMTD

- Physiquement
 - C'est la différence de température de deux fluides à un bout de l'échangeur moins cette différence à l'autre bout, divisée par le logarithme naturel du quotient de ces deux différences de températures

$$\Delta T_{lm} = \frac{\Delta T_2 - \Delta T_1}{\ln\left(\frac{\Delta T_2}{\Delta T_1}\right)} = \frac{\Delta T_1 - \Delta T_2}{\ln\left(\frac{\Delta T_1}{\Delta T_2}\right)}$$

Méthode LMTD

- Échangeur co-courant

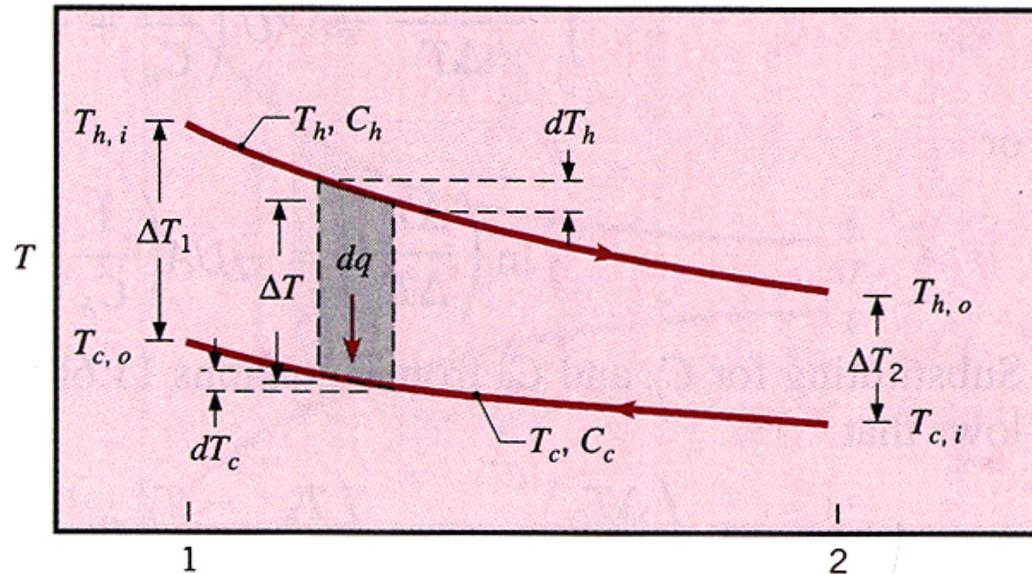
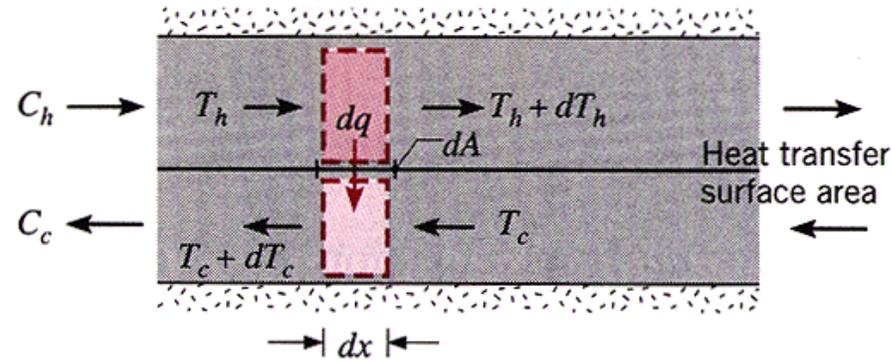


Méthode LMTD

- Hypothèses de calculs supplémentaires
 - Pas de changements d'énergie cinétique et potentielle dans l'échangeur;
 - Les propriétés sont constantes
 - Note: Il est raisonnable de supposer que la chaleur spécifique et que le coefficient de transfert U ne varient pas entre les stations 1 et 2 dans l'échangeur.
- Que cherche-t-on?
 - Une expression pour calculer q à l'aide du coefficient U et de la surface d'échange A .

Méthode LMTD

- Échangeur contre-courant



Méthode LMTD

- Résumé des différences de température à l'entrée et à la sortie

Co-courant: $\Delta T_2 = T_{m,c,s} - T_{m,f,s}$

$$\Delta T_1 = T_{m,c,e} - T_{m,f,e}$$

Contre-courant: $\Delta T_2 = T_{m,c,s} - T_{m,f,e}$

$$\Delta T_1 = T_{m,c,e} - T_{m,f,s}$$

ΔT_2 → Différence de température à la station 2

ΔT_1 → Différence de température à la station 1

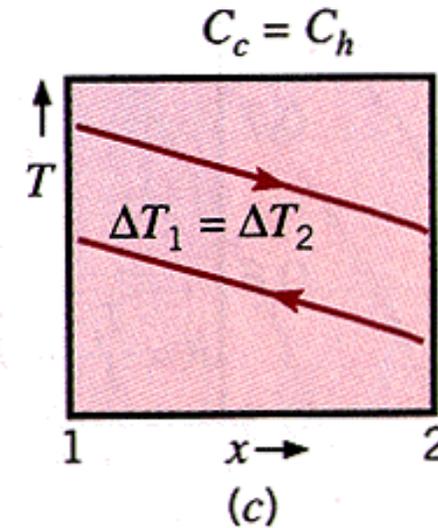
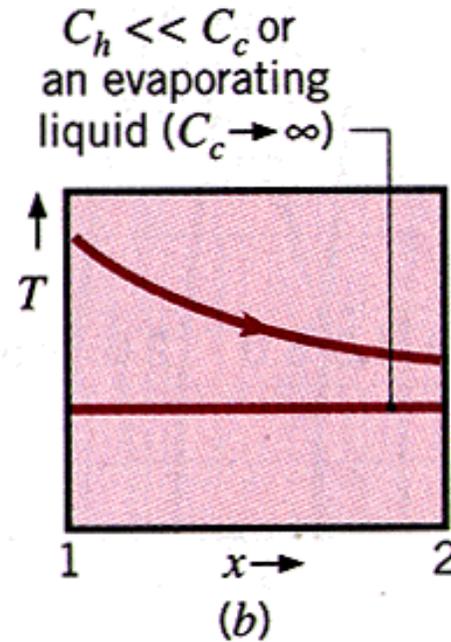
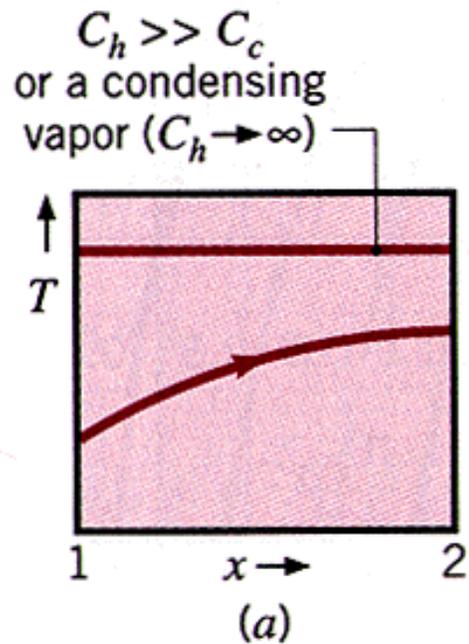
Méthode LMTD

- Échangeur à courant parallèle
 - Pour ces échangeurs, la différence de température moyenne logarithmique (LMTD) est utilisée directement dans l'équation de calcul de la quantité de chaleur échangée:

$$q = U A \Delta T_{lm}$$

Méthode LMTD

- Des cas limites se produisent
 - Le taux de capacité thermique de l'un des fluides est de loin supérieur à l'autre.



Méthode LMTD

- Échangeurs coque et tubes ou à faisceau tubulaires
 - Quelle doit être l'analyse lorsque le cylindre extérieur devient coque et que le nombre de cylindres intérieurs devient plus grand que 1 ???
 - Pour ces échangeurs, la différence de température moyenne logarithmique doit être corrigée par un coefficient de correction F .

$$q = U A F \Delta T_{lm}$$

Méthode LMTD

- Comment déterminer F
 - Le facteur F est estimé à partir d'expressions algébriques;
 - Des abaques donnent F en fonction de deux paramètres sans dimension calculés à partir des températures terminales des deux fluides;
 - Le LMTD utilisé doit être celui pour l'échangeur à **contre-courant**.

$$P = \frac{t_s - t_e}{T_e - t_e} \qquad R = \frac{T_e - T_s}{t_s - t_e}$$

Méthode LMTD

- Y a-t-il aussi une correction à apporter pour l'échangeur à courants croisés ou transversaux ?
 - Oui, et puisque des expressions algébriques de F peuvent aussi être obtenues, des graphiques corrélant F en fonction de R et P sont disponibles pour effectuer le design de ce type d'échangeur.
- Ces graphiques sont disponibles dans le supplément au chapitre 11 du manuel de référence (Fund. Heat & Mass Transfer)
 - Il n'y aura aucun problème requérant absolument l'usage de la méthode LMTD pour des échangeurs complexes.

Méthode LMTD

- Quelques remarques utiles
 - Peu importe quel fluide circule côté coque ou tube;
 - Lorsque le différentiel de température de l'un des fluides est nul, **P** ou **R** est nul et **F** = 1;
 - Il est possible de traiter les cas particuliers des condenseurs et des évaporateurs;
 - Le calcul de l'échangeur est alors indépendant de sa configuration.

Méthode LMTD

- Conditions requises
 - Les quatre températures de l'échangeur
 - Elles sont prescrites
 - Elles sont connues
 - Elles peuvent être déterminées à l'aide des deux équations de bilan énergétique

$$q = \dot{m}_c c_{p,c} (T_{m,c,e} - T_{m,c,s})$$

$$q = \dot{m}_f c_{p,f} (T_{m,f,s} - T_{m,f,e})$$

- Conditions requises
 - Si seulement les températures d'entrée des deux fluides sont connues, la méthode LMTD requiert une procédure **itérative**.

Fin de la partie 2

Merci de votre attention !



Prenez une pause de quelques minutes avant de poursuivre avec la partie 3

Plan de la présentation

- Introduction et objectifs de la capsule
- Types d'échangeurs
- Méthodologie de calcul
- Coefficient de transfert thermique global
- Analyse : différence de température logarithmique moyenne (LMTD)
- **Analyse : Méthode NUT (NTU)**
- Hydrodynamique
- Échangeurs compacts
- Conclusion

Méthode NTU

- Caractéristiques
 - Méthode Nombre d'Unités de Transfert (NUT);
 - Cette méthode est basée sur le calcul de l'efficacité, ε , de l'échangeur;

$$\varepsilon = q / q_{max}$$

- L'efficacité maximale de 100 % peut, en théorie, être atteinte dans un échangeur à contre courant infini;
- Dans ce cas, le fluide dont le taux de capacité thermique est le plus faible, expérimente le maximum de différence de température;

$$q_{max} = C_{min}(T_{m,c,e} - T_{m,f,e})$$

Méthode NTU

- Procédure de calcul
 - Calcul des taux de capacité thermique

$$C_f = \dot{m}c_{p,f} \quad C_c = \dot{m}c_{p,c}$$

- De la définition de l'efficacité

$$\varepsilon = C_c (T_{m,c,e} - T_{m,c,s}) / C_{min} (T_{m,c,e} - T_{m,f,e})$$

$$\varepsilon = C_f (T_{m,f,s} - T_{m,f,e}) / C_{min} (T_{m,c,e} - T_{m,f,e})$$

- Le taux de transfert thermique est alors :

$$q = \varepsilon C_{min} (T_{m,c,e} - T_{m,f,e})$$

Méthode NTU

- Concept
 - Pour n'importe quel échangeur, il est possible de déterminer l'efficacité en fonction d'un nombre d'unités de transfert et du rapport des taux de capacités minimum et maximum

$$\varepsilon = f(NTU, C_r)$$

$$\text{Où } NTU = UA / C_{min} \text{ et } C_r = C_{min} / C_{max}$$

- En résumé
 - Consultez les tableaux 11.3 et 11.4 pour obtenir l'efficacité en fonction de NTU et C_r et NTU en fonction de ε et C_r , respectivement.

Méthode NTU

- Obtention de la relation $\varepsilon - NTU$ pour l'échangeur co-courant
 - L'intégrale de $\Delta T / T$ entre l'entrée et la sortie donne :

$$\ln \left[\frac{(T_{m,c,s} - T_{m,f,s})}{(T_{m,c,e} - T_{m,f,e})} \right] = -\frac{UA}{C_{min}} (1 + C_r)$$

$$\frac{(T_{m,c,s} - T_{m,f,s})}{(T_{m,c,e} - T_{m,f,e})} = \exp(-NTU(1 + C_r))$$

- En manipulant le terme de gauche

$$\frac{(T_{m,c,s} - T_{m,f,s})}{(T_{m,c,e} - T_{m,f,e})} = 1 - \varepsilon(1 + C_r)$$

Méthode NTU

- Obtention de la relation $\varepsilon - NTU$ pour l'échangeur co-courant
 - En égalant les deux membres de droite :

$$\varepsilon = \left[\frac{1 - \exp(NTU(1 + C_r))}{(1 + C_r)} \right]$$

Méthode NTU

- La méthode NTU consiste donc à résoudre le système suivant:

$$q = \dot{m}_c c_{p,c} (T_{m,c,e} - T_{m,c,s})$$

$$q = \dot{m}_f c_{p,f} (T_{m,f,s} - T_{m,f,e})$$

$$q = \varepsilon C_{min} (T_{m,c,e} - T_{m,f,e})$$

- En pratique, on utilise des graphiques qui donnent ε en fonction de C_r et NTU ou encore il est possible de programmer les expressions
 - Figures 11.10-11.15 et tableaux 11.3 et 11.4

Méthode NTU

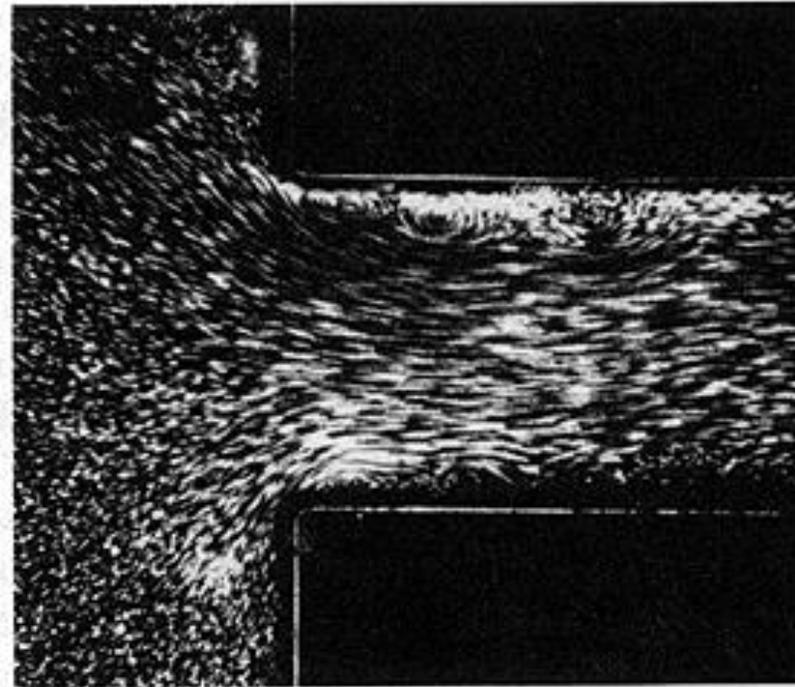
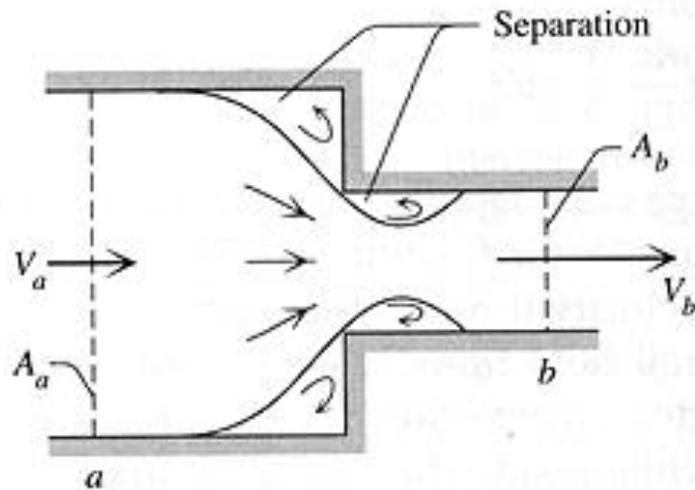
- Conditions requises et résultats
 - L'efficacité ε peut être obtenue explicitement en fonction de C_r et NTU;
 - En connaissant l'arrangement géométrique U , A , $T_{m,f,e}$, $T_{m,c,e}$ et les débits, les températures de sortie peuvent être obtenues sans itérations successives;
 - Inversement il est possible d'obtenir A connaissant les températures de sortie;
 - Un autre avantage de la méthode NTU réside dans la forme des courbes $\varepsilon = f(C_r, NTU)$ qui sont moins sujettes à des erreurs de lecture que les courbes $F = f(P, R)$ dans la méthode LMTD.

Plan de la présentation

- Introduction et objectifs de la capsule
- Types d'échangeurs
- Méthodologie de calcul
- Coefficient de transfert thermique global
- Analyse : différence de température logarithmique moyenne (LMTD)
- Analyse : Méthode NUT (NTU)
- ***Hydrodynamique***
- Échangeurs compacts
- Conclusion

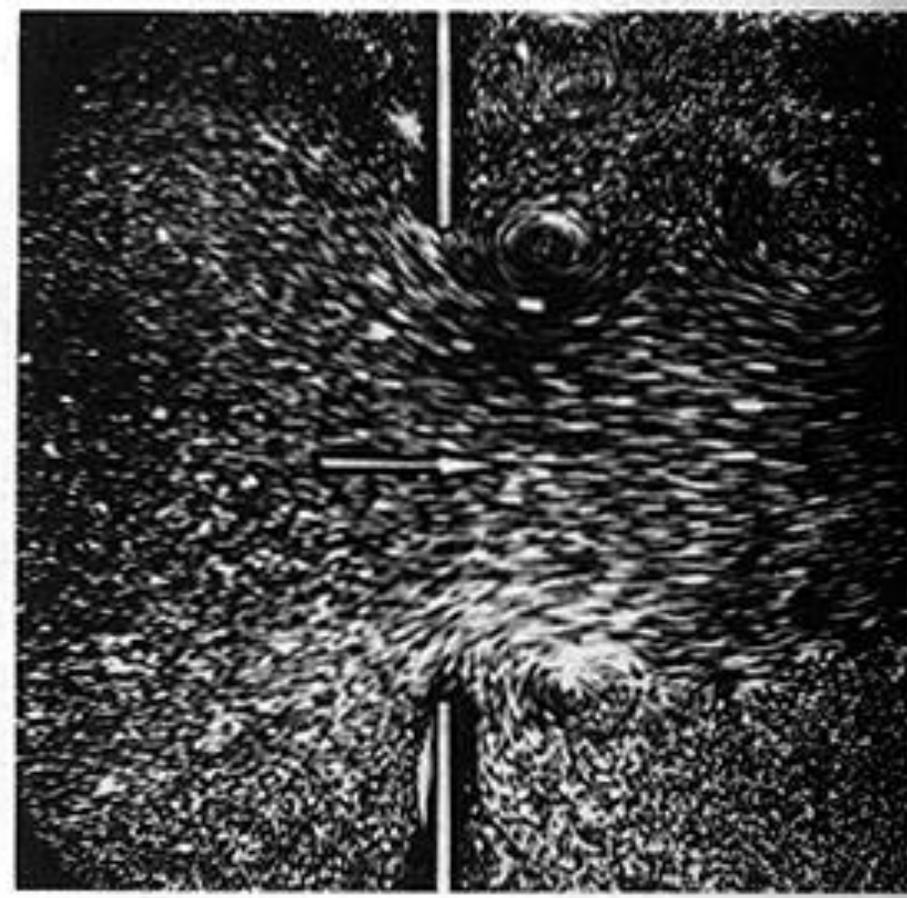
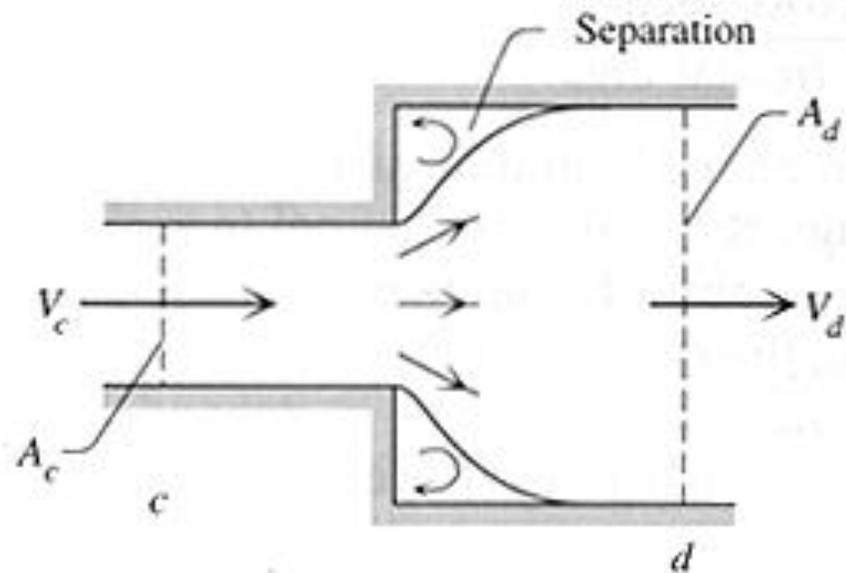
Hydrodynamique

- La circulation du fluide dans un échangeur requiert l'usage de pompes et/ou de ventilateurs.
- Contraction :



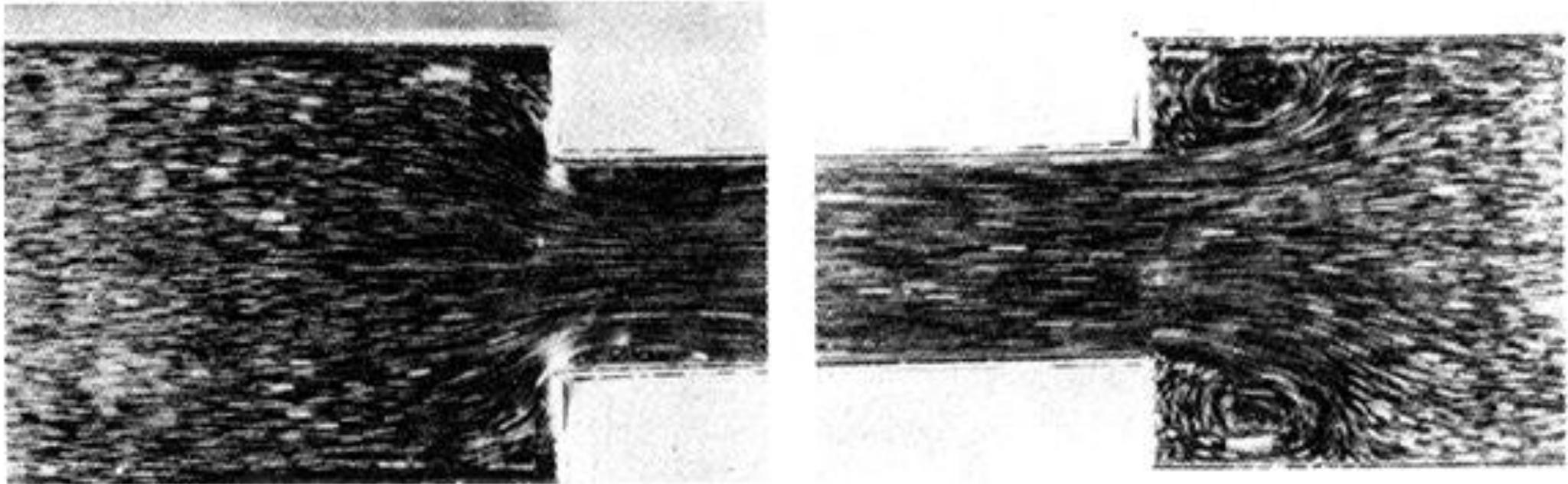
Hydrodynamique

- Expansion :



Hydrodynamique

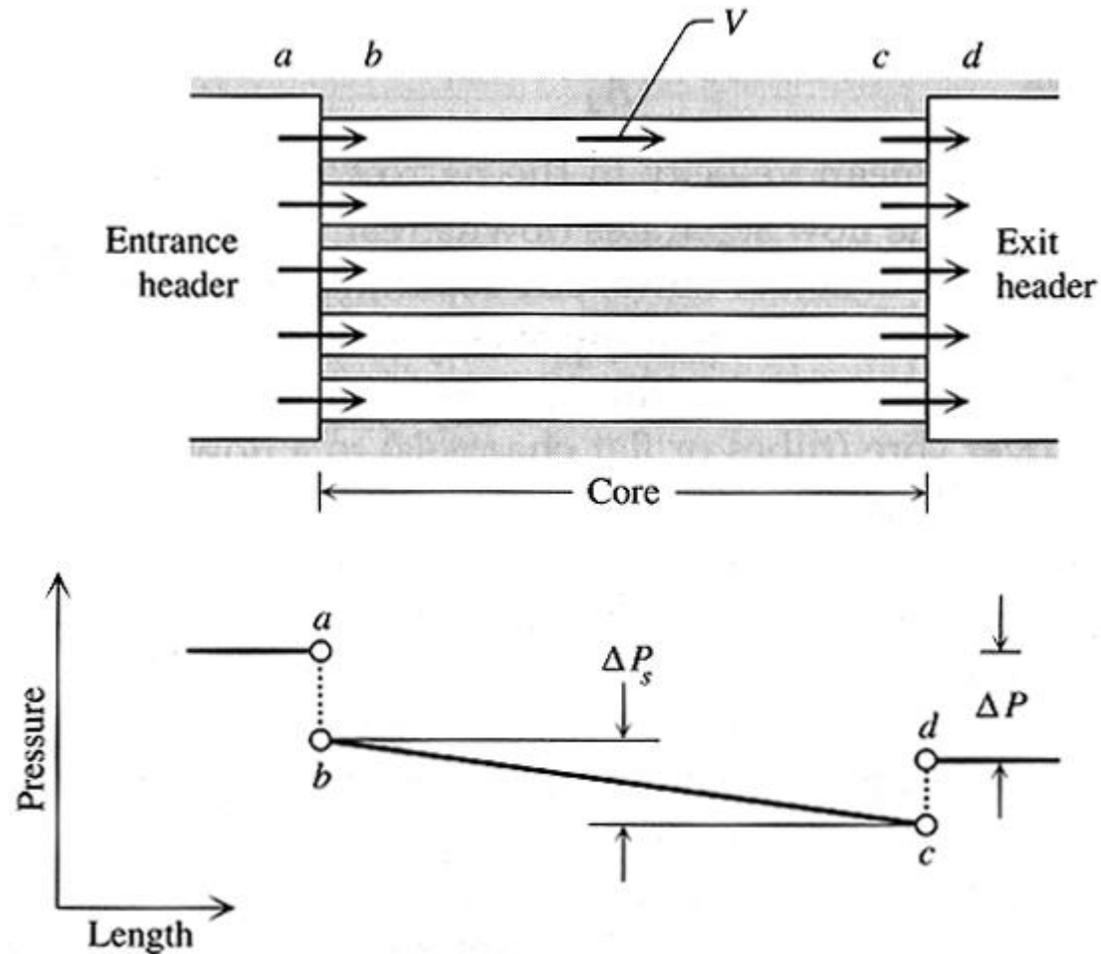
- Variations de section



Largeur 0.4 m. Vitesse 15 cm/s (gauche) et 20 cm/s (droite)

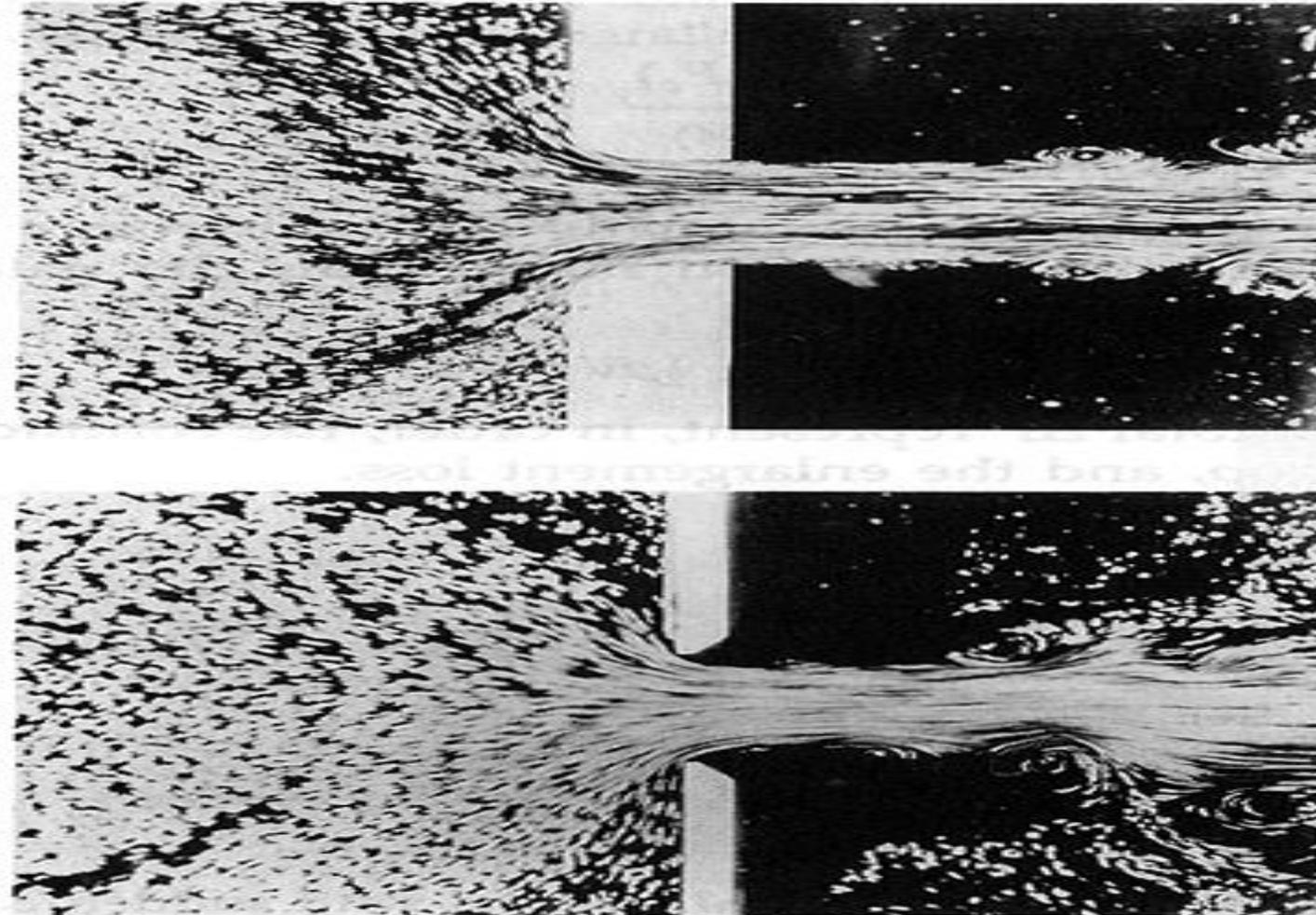
Hydrodynamique

- Distribution de pression dans un échangeur



Hydrodynamique

- Comparaison entre deux types d'orifice

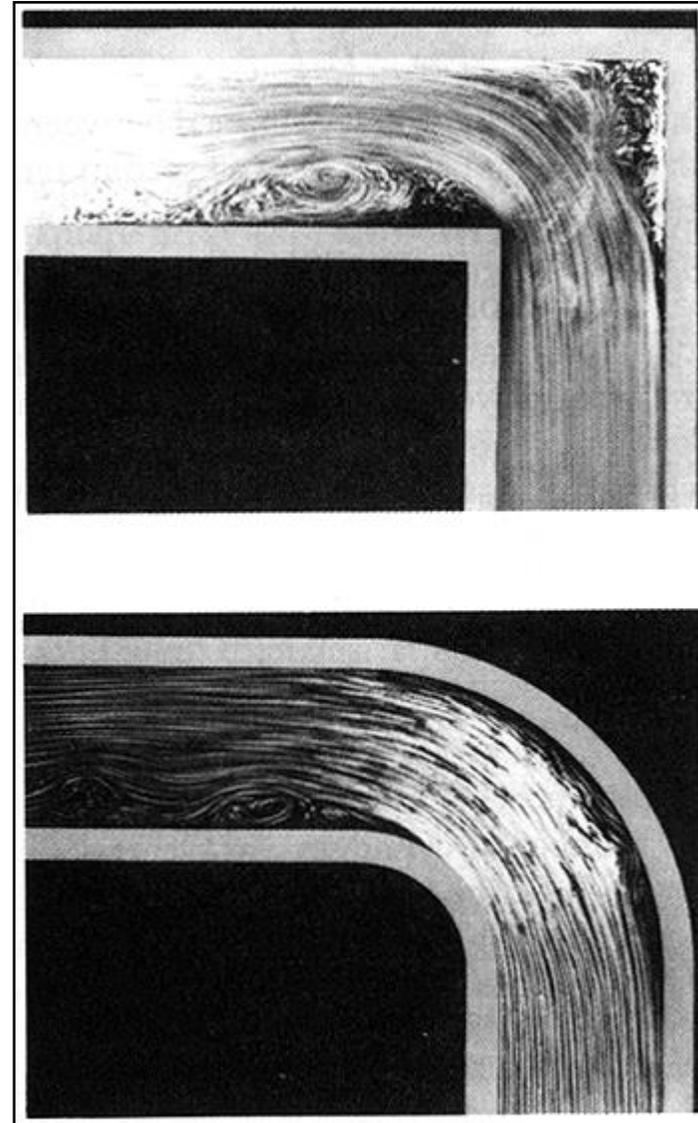


Hydrodynamique

- Écoulement dans un coude
 - Brusque variation
 - Coude circulaire

Largeur 2 cm

Vitesse 10 cm/s



Plan de la présentation

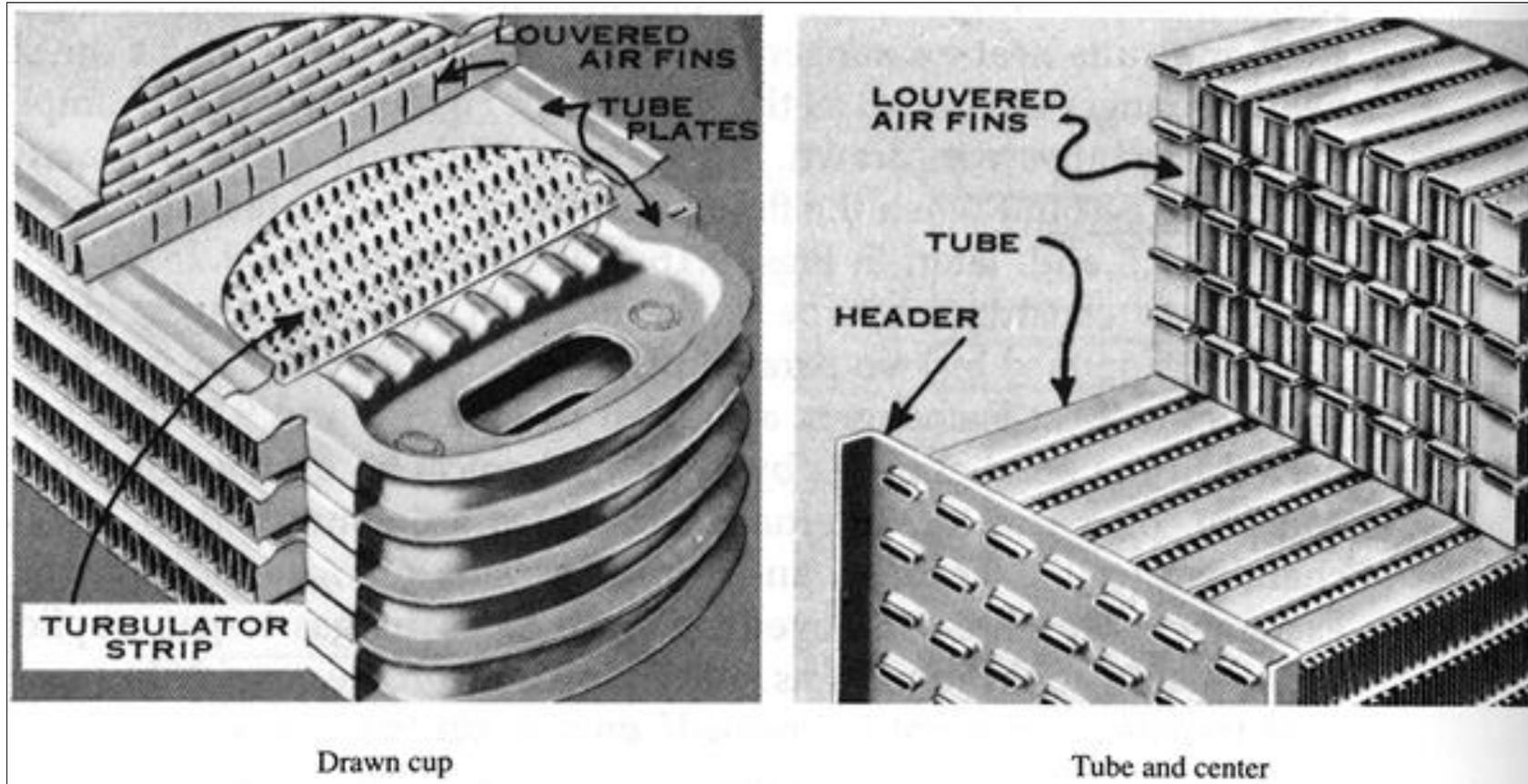
- Introduction et objectifs de la capsule
- Types d'échangeurs
- Méthodologie de calcul
- Coefficient de transfert thermique global
- Analyse : différence de température logarithmique moyenne (LMTD)
- Analyse : Méthode NUT (NTU)
- Hydrodynamique
- ***Échangeurs compacts***
- Conclusion

Échangeurs compacts

- Application :
 - Lorsqu'une grande surface d'échange est requise ou un faible volume ou un poids faible;
 - Lorsque l'un des fluides est un gaz;
 - Les différences résident surtout dans le type d'ailettes utilisées.

Échangeurs compacts

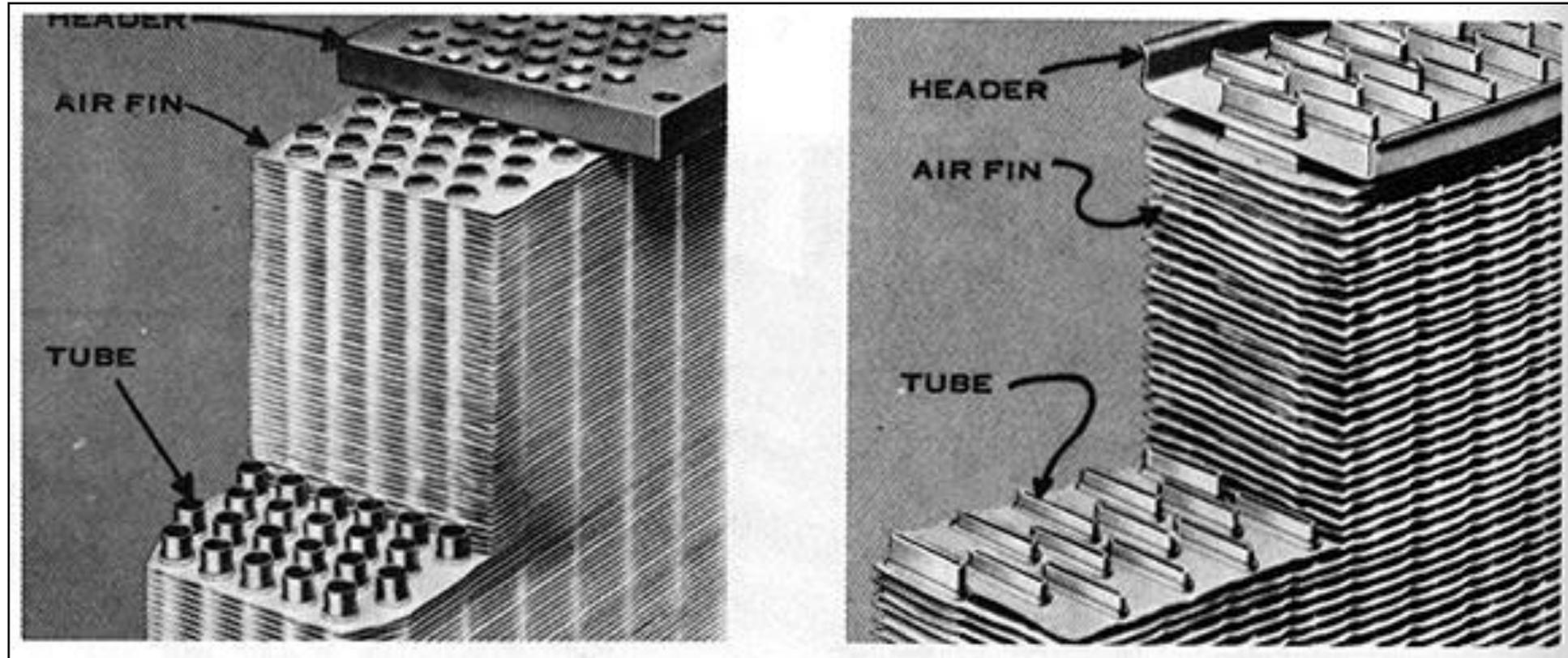
- Échangeurs compacts à plaques et ailettes



General Motors Corp.

Échangeurs compacts

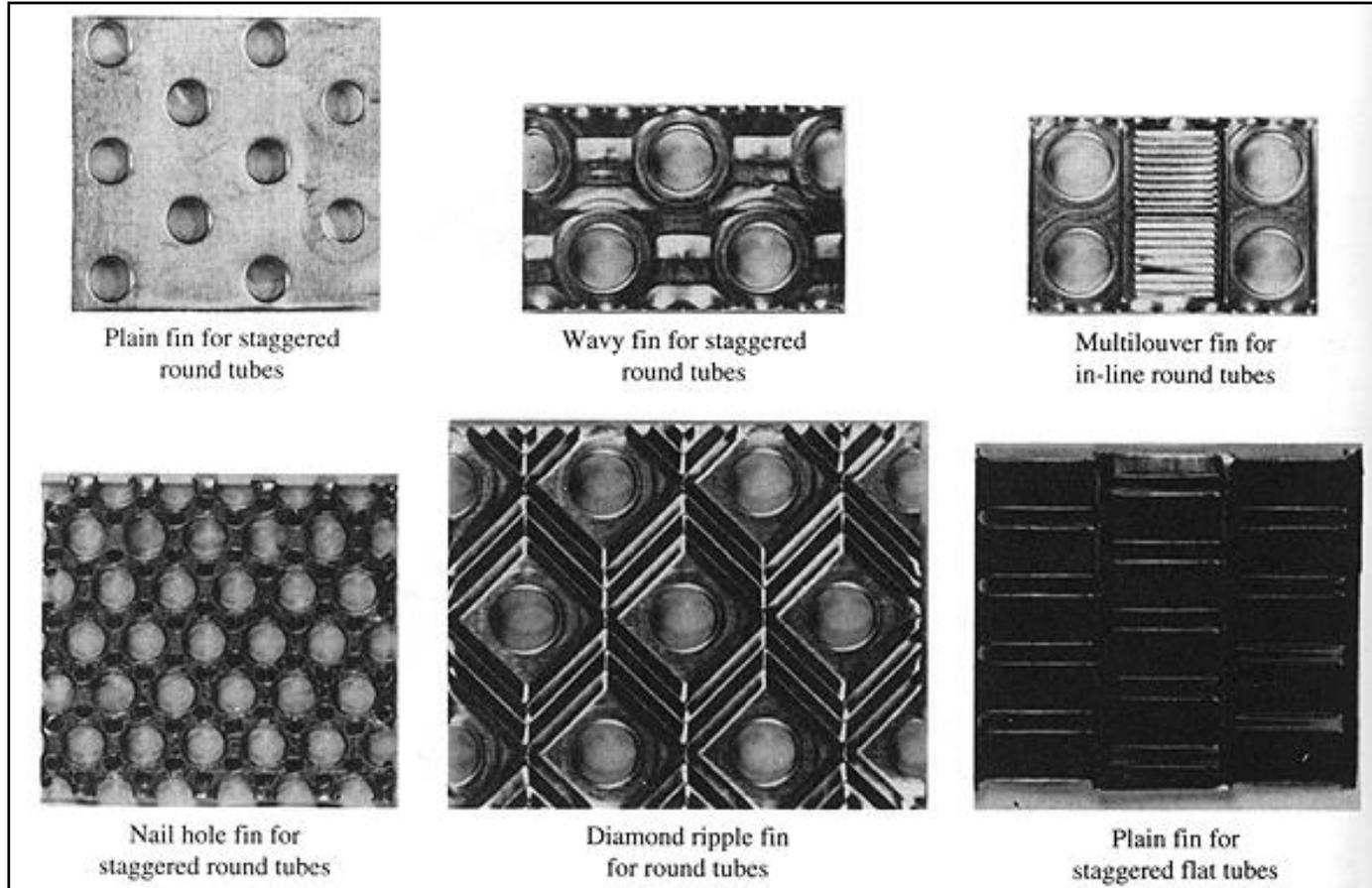
- Échangeurs tubes-plaques à courants croisés



General Motors Corp.

Échangeurs compacts

- Détails d'échangeurs tubes-ailettes



General Motors Corp., Lockport, NY

Échangeurs compacts

- Résultats d'analyse
 - Pour ces configurations spécifiques, les caractéristiques de transfert thermique et d'écoulement des fluides sont généralement présentées en termes de facteurs, j_H , de Colburn et du facteur de friction, f , corrélés en termes du nombre de Reynolds, Re .
 - La figure 11.16 constitue un excellent exemple de tableau fourni par le fabricant.
 - Dans ce cas, il s'agit d'un échangeur CF-7.0-5/8J [Kays and London].

Échangeurs compacts

- Résultats d'analyse

- Les paramètres caractéristiques sont déterminés à partir de :

- Facteur thermique de Colburn:

$$J_H = St Pr^{\frac{2}{3}}$$

- Nombre de Reynolds :

$$Re = G D_h / \mu$$

- Nombre de Stanton :

$$St = h / G c_p$$

- Paramètre G, quantité de mouvement spécifique :

$$G = \rho * \vec{V}_{max} = \frac{\rho * \vec{V}_{max} A_{fr}}{A_{ff}} = \frac{\dot{m}}{A_{ff}} = \frac{\dot{m}}{\sigma A_{fr}}$$

Échangeurs compacts

- Paramètres spécifiés par le manufacturier
 - n : nb d'ailettes par mètre de tube
 - D_h : Diamètre hydraulique
 - A_{ff} : Aire de la section transversale de passage du fluide
 - A_{fr} : Aire de la section transversale
 - α : Compacité ou densité de surface
 - σ : Rapport A_{ff}/A_{fr}
 - A_f : Surface totale des ailettes
 - A : Surface totale d'échange

Échangeurs compacts

- Méthodologie
 - Le rapport A_f / A est utilisé pour déterminer le rendement de la surface avec ailettes (côté gaz) :
 - Ici le rendement de l'ailette circulaire est obtenu d'abord en consultant la figure 3.19, par la suite on utilise l'équation 11.3.
 - La compacité α est employée pour déterminer :
 - Le volume hors tout dans un calcul de design (surface déterminée autrement ou imposée);
 - La surface requise dans un calcul de performance (volume hors tout connu).

Échangeurs compacts

- Méthodologie
 - Les résultats empiriques (Figure 11.16) permettent de déterminer un coefficient de transfert moyen pour les surfaces à ailettes.
 - Puis le coefficient de transfert global U est évalué avec l'équation 11.1 et
 - Avec LMTD
 - Avec NTU
 - Enfin, le design ou le calcul de performance est effectué.

Échangeurs compacts

- Les pertes de charges sont critiques dans un échangeur compact
 - Les paramètres caractéristiques sont déterminés à partir de :

- Pertes de charge, en fonction du volume spécifique :

$$\Delta p = \frac{G^2 v_e}{2} \left[(1 + \sigma^2) \left(\frac{v_s}{v_e} - 1 \right) + f \frac{A}{A_{ff}} \frac{v_m}{v_e} \right]$$

- Volume spécifique moyen :

$$v_m = (v_e + v_s) / 2$$

- Pertes de charges vs vitesse de l'écoulement :

$$\Delta p \sim \bar{V}^2$$

- Puissance requise :

$$P = \Delta p \dot{V} = \Delta p \bar{V} A = \Delta p \dot{m} / \rho = \Delta p \dot{m} v$$

Plan de la présentation

- Introduction et objectifs de la capsule
- Types d'échangeurs
- Méthodologie de calcul
- Coefficient de transfert thermique global
- Analyse : différence de température logarithmique moyenne (LMTD)
- Analyse : Méthode NUT (NTU)
- Hydrodynamique
- Échangeurs compacts
- **Conclusion**

Conclusion

- Quels étaient les objectifs de cette thématique ?
 - Savoir quelles sont les caractéristiques physiques des différentes configurations possibles pour les échangeurs de chaleur;
 - présenter des outils permettant d'effectuer des calculs approximatifs d'échangeurs à courants séparés;
 - reconnaître qu'une analyse plus poussée requiert l'usage de références et de méthodes plus approfondies;
 - connaître les autres types d'échangeurs où les fluides ne sont pas séparés par une paroi.

Auto-tests disponibles dans le livre de référence

- Exemple 11.1
 - Échangeur contre-courant concentrique
- Exemple 11.2; 11.3 & 11.4
 - Échangeur à courant croisés avec tubes-ailettes
- Exemple 11.5
 - Échangeur coque et tubes (condenseur)
- Exemple 11.6
 - Échangeur compact

Dans les cours Énergie et Énergies renouvelables, les calculs d'échangeurs seront des plus simples. Ces exemples sont cités à titre illustratifs seulement. Les exercices proposés plus loin aussi. Ils seront progressivement adaptés (simplifiés) au niveau de ce cours.



Merci de votre attention !

Références

- Incropera, F. P., & DeWitt, D. P. (2002). *Fundamentals of heat and mass transfer*. New York: J. Wiley.
- Ou éditions subséquentes

Si vous avez des questions à formuler, veuillez les poser par écrit et spécifier le nom et le numéro de la présentation. Nous vous répondrons le plus rapidement possible.

Période de questions



Exercice

- 2.4.5.1 – La bouilloire industrielle
 - Dans un certain type de bouilloire industrielle, des produits de combustion circulent dans un arrangement de tubes à parois minces qui transfèrent leur chaleur à un courant d'eau transversal. À l'installation, le coefficient de transfert U était de $400 \text{ W/m}^2\text{K}$. Après un an d'opération les coefficients d'encrassement interne et externe équivalent à $0,0015 \text{ m}^2\text{K/W}$ et $0,0005 \text{ m}^2\text{K/W}$, respectivement. Doit-on nettoyer les surfaces?

Exercice

- 2.4.5.2 – L'échangeur contre-courant
 - Un échangeur à tubes concentriques et écoulement contre-courant est conçu pour élever la température d'eau de 20°C à 80°C par un écoulement provenant d'une transmission dont l'huile sort à 160°C pour entrer dans le tube externe et ressortir de l'échangeur à 140°C. La paroi mince entre les deux fluides est cylindrique et son rayon est de 10mm. Le coefficient U est de 500W/m²K et les conditions de design requièrent un taux de transfert de 3000W.
 - Après 3 ans d'opération, l'encrassement côté eau provoque une réduction de la température de sortie à 65°C. Quels sont alors: U , $T_{huile,s}$, q , $R''_{f,eau}$?

Exercice

- 2.4.5.4 – Le récupérateur

– Un type de récupération consiste à préchauffer l'air à mélanger à un combustible par les gaz d'échappement de la réaction. Considérez un tel récupérateur à une passe transversale constitué de 80 tubes de céramique (carbure de silice $k = 20 \text{ W/m K}$) de 1.4 m de long dans un arrangement aligné où $S_L = 100\text{mm}$ et $S_T = 120\text{mm}$. Les diamètres intérieur et extérieur sont de 55 et 80 mm, respectivement. L'air froid arrive sur l'arrangement de tubes avec une vitesse de 1 m/s et une température de 300K alors que les gaz entrent dans les tubes à 1400K où le facteur d'encrassement est de $2e-4 \text{ m}^2\text{K/W}$. Les débits d'air et de gaz sont de 1,0 kg/s et 1,05 kg/s, respectivement.

Exercice

- 2.4.5.4 – Le récupérateur (suite)
 - En première approximation,
 - Traiter l'air à 1atm 300K
 - Traiter le gaz à 1atm 1400K
 - Traiter la paroi à 800K
 - Si 1% du combustible est économisé par 10°C d'accroissement de température de l'air, combien d'énergie sera sauvée pour les conditions prescrites?
 - Quel serait ce pourcentage si $UA = 300\text{W/K}$?, 600W/K ?
 - Que faire pour augmenter le produit UA dans un échangeur?

Exercice

- 2.4.5.5 – Le refroidisseur

– Dans un type de refroidisseur, un arrangement de tubes d'aluminium ($k = 237 \text{ W/mK}$) à ailettes de diamètre interne de 13,8mm et de configuration semblable à celle de la Figure 11.20, est installé dans une conduite carrée de $0,16\text{m}^2$ d'aire frontale. $1,5\text{kg/s}$ d'air initialement à 37°C circule côté coque et du réfrigérant-12 saturé à 1atm circule côté tube pour y être évaporé. Cette configuration permet un coefficient d'échange de $5000 \text{ W/m}^2\text{K}$ côté fréon. Si l'évaporation doit faire en sorte que l'air ressorte à 17°C au maximum, combien de rangées de tubes seront nécessaires?

Liste de questions à réflexion

- Quels sont les deux agencements possibles pour un échangeur de chaleur à tubes concentriques?
- Pour chaque disposition, quelles restrictions sont associées aux températures de sortie du fluide?
- Appliqué à un échangeur de chaleur à flux croisés, qu'entend-on par les termes avec et sans mélange? En quel sens ces termes sont-ils des idéalizations des conditions réelles?
- Pourquoi les chicanes sont-elles utilisées dans un échangeur de chaleur à tubes et tubes?
- Quelle est la principale caractéristique distinctive d'un échangeur de chaleur compact?
- Quel est l'effet de l'encrassement sur le coefficient global de transfert de chaleur et donc sur les performances d'un échangeur de chaleur?
- Quel est l'effet des surfaces munies d'ailettes sur le coefficient global de transfert de chaleur et donc sur les performances d'un échangeur de chaleur? Quand l'utilisation des ailettes est-elle la plus appropriée?
- Quand le coefficient global de transfert de chaleur peut-il être exprimé comme $U = (h_i^{-1} + h_o^{-1})^{-1}$?
- Quelle est la forme appropriée de la différence de température moyenne pour les deux fluides d'un échangeur de chaleur parallèle ou à contre-courant?
- Que dire du changement de température d'un fluide saturé en évaporation ou en condensation dans un échangeur de chaleur?

Liste de questions à réflexion

- Le fluide ayant le taux de capacité thermique minimum ou maximum subira-t-il le plus grand changement de température dans un échangeur de chaleur?
- Pourquoi le débit thermique maximal possible pour un échangeur de chaleur n'est-il pas égal à $C_{\max}(T_{h,i} - T_{c,i})$?
- La température de sortie du fluide froid peut-elle dépasser la température d'entrée du fluide chaud? Quelle est l'efficacité d'un échangeur de chaleur?
- Quelle est sa plage de valeurs possibles?
- Qu'est-ce que le nombre d'unités de transfert? Quelle est sa plage de valeurs possibles?
- En général, comment l'efficacité change-t-elle si la taille (surface) d'un échangeur de chaleur est augmenté? Si le coefficient de transfert de chaleur global est augmenté? Si le ratio des taux de capacité thermique est diminué? Quelle pénalité est associée à l'augmentation de la taille d'un échangeur de chaleur? Avec l'augmentation du coefficient global de transfert de chaleur?

Cette présentation permet de répondre explicitement à toutes ces questions.