

Technique du froid & composants frigorifiques

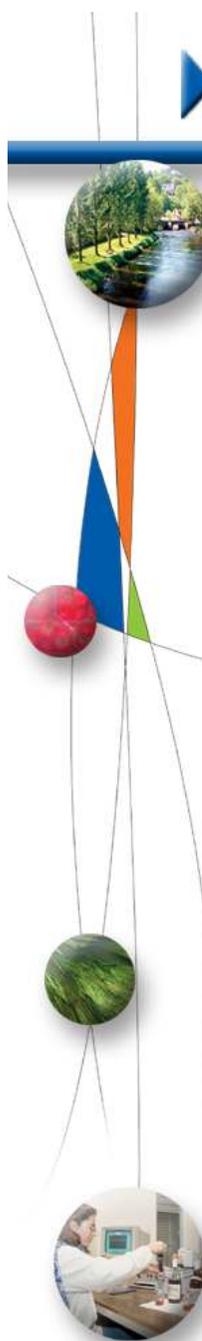
Mohammed YOUBI-IDRISSI
Chargé de Recherche, Cemagref



LICENCE PROFESSIONNELLE
MANAGEMENT DE LA CHAÎNE DU FROID - TRANSPORT ET LOGISTIQUE



► Echangeurs thermiques



Échangeurs thermiques :

- systèmes de transmission de la chaleur d'un fluide chaud vers un fluide froid
- Présents à 90% dans les procédés industriels (chimie, agroalimentaire, énergie, ...)
- fluide : vapeur, gaz, liquide, mélange liquide/vapeur, ...
- fluide chaud : cède de la chaleur
- fluide froid : absorbe de la chaleur

Modes de transfert de chaleur :

- conduction (à l'intérieur des solides), convection (fluide en mouvement) et rayonnement (à travers les gaz/vapeurs)

► Echangeurs thermiques



Classification des échangeurs

- nature des fluides
- technologique : tubes, à plaques, canaux, caloducs, directs, ...
- fonctionnel : avec ou sans changement de phase, co-courant, contre courant, courant croisé, ...
- niveaux de température
- compacité ($700\text{m}^2/\text{m}^3$), matériaux, mode de transfert, ...



► Echangeurs thermiques



Echangeurs avec ou sans changement de phase

- ❖ chaleur sensible : conduit à une variation de température
- ❖ chaleur latente : produit un changement de phase

SANS CHANGEMENT DE PHASE

chaleur sensible seule

AVEC CHANGEMENT DE PHASE

chaleur latente et/ou sensible

- ❖ évaporateur : le fluide froid s'évapore
- ❖ condenseur : le fluide chaud se condense



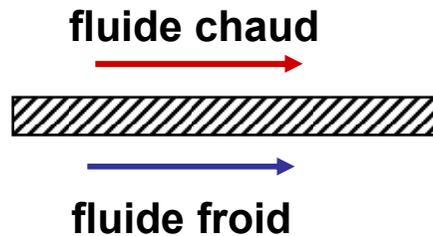
► Echangeurs thermiques



Echangeurs à paroi

COURANTS PARALLELES

- co-courants
- antiméthodique
- équmécourant



fluide chaud

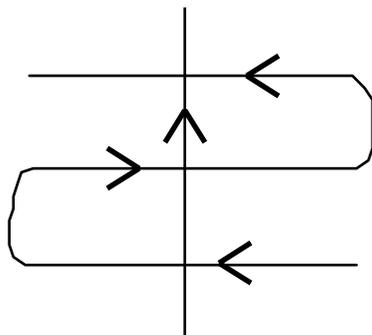


fluide froid

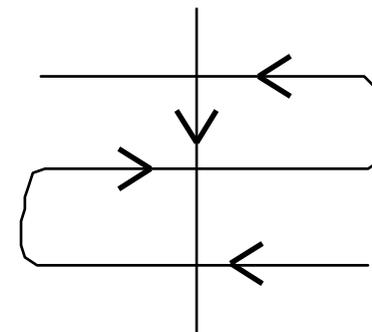
- contre-courants
- méthodique

COURANTS CROISES

nombre de passes



- co-courants
- antiméthodique
- équmécourant



- contre-courants
- méthodique

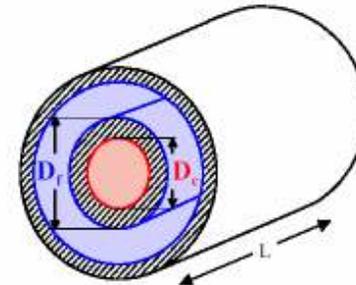


► Echangeurs thermiques

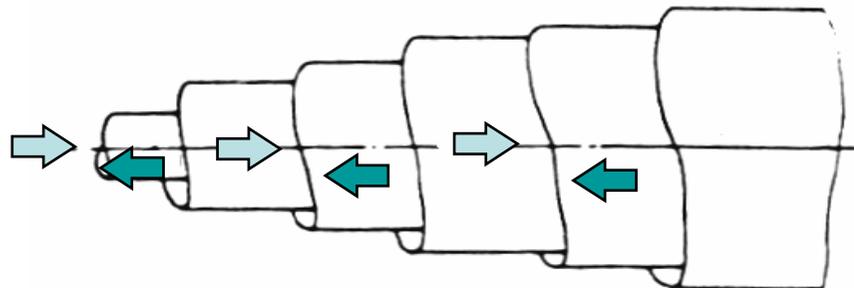


Echangeurs tubulaires

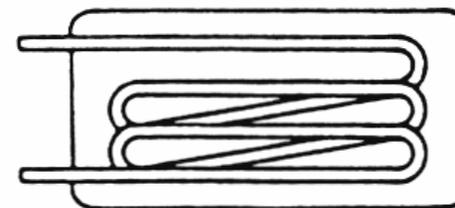
⇒ Mono-tubulaire



⇒ Multitubulaire : tubes concentriques



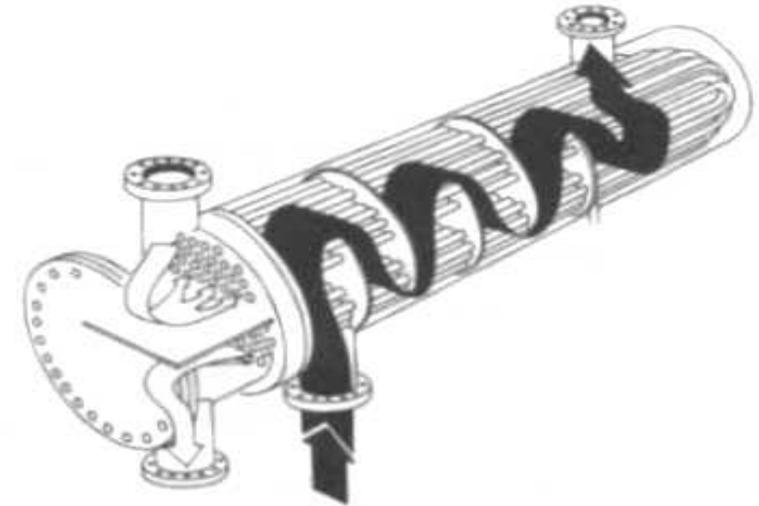
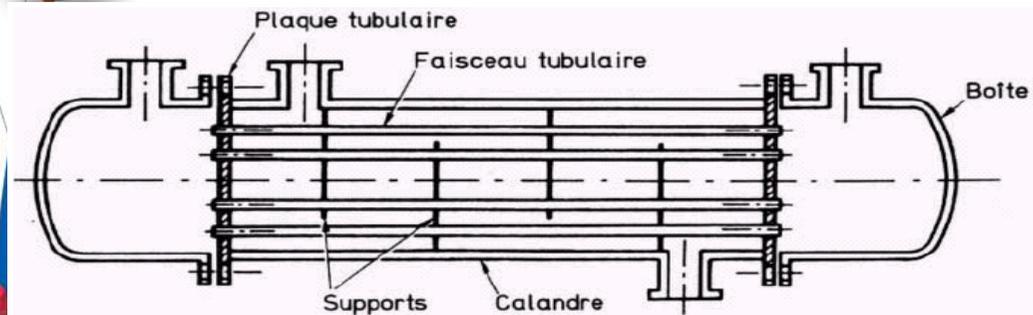
⇒ Multitubulaire immergés



► Echangeurs thermiques



⇒ Multitubulaire tube et calandre



⇒ 3 classes

- classe A : à boîte fixe, conditions inhabituelles d'utilisation (gaz toxique)
- classe B : à boîte flottante, conditions classiques
- classe C : à tubes en U, applications à faible risque

⇒ Boîte : distributeur + collecteur du fluide

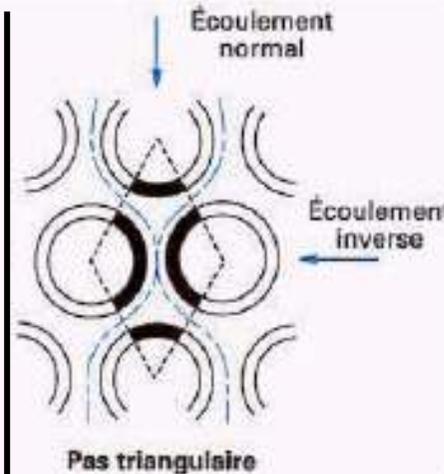
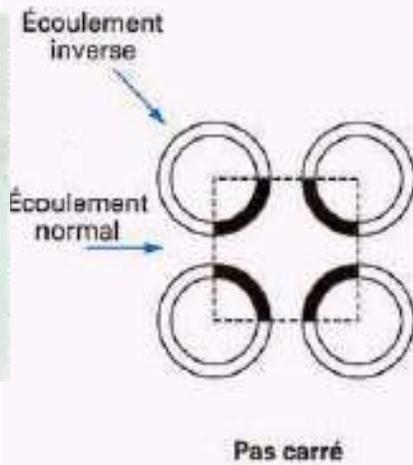
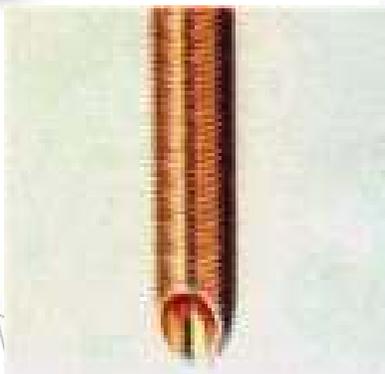
⇒ Calandre : enveloppe métallique compatible avec le fluide

⇒ Plaques tubulaires : supports des tubes



► Echangeurs thermiques

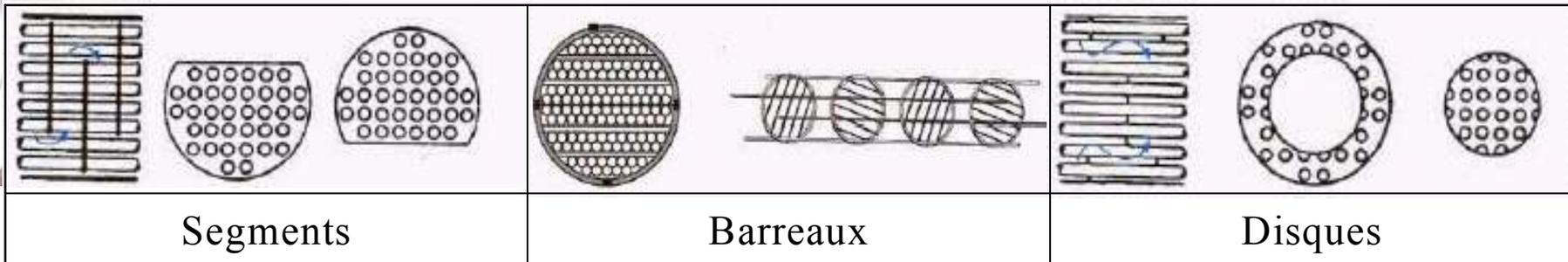
➡ Tubes : diamètre normalisé et longueur standard
(2,44 / 3,05 / 3,66 / 4,88 / 6,1)



Facilité de maintenance

Compacte et économique

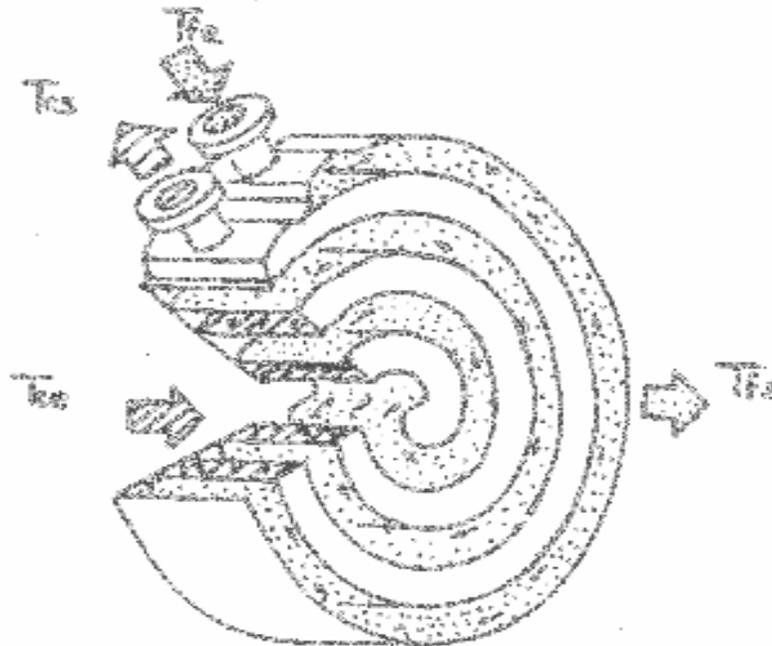
➡ Chicanes : augmentation de la turbulence et de la rigidité, mais dP



► Echangeurs thermiques



Echangeurs à spirales



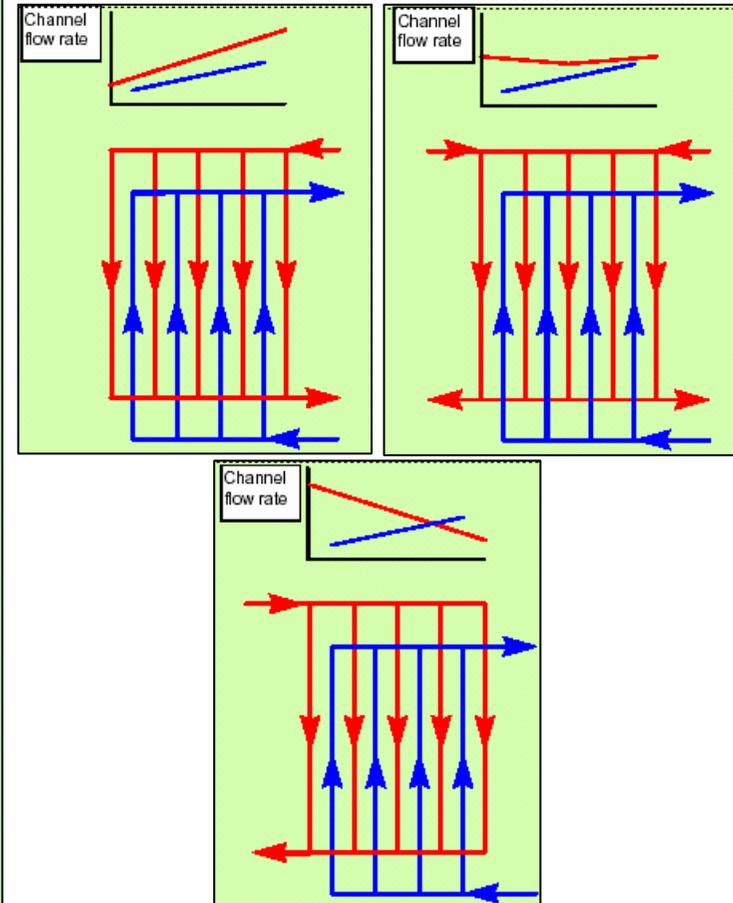
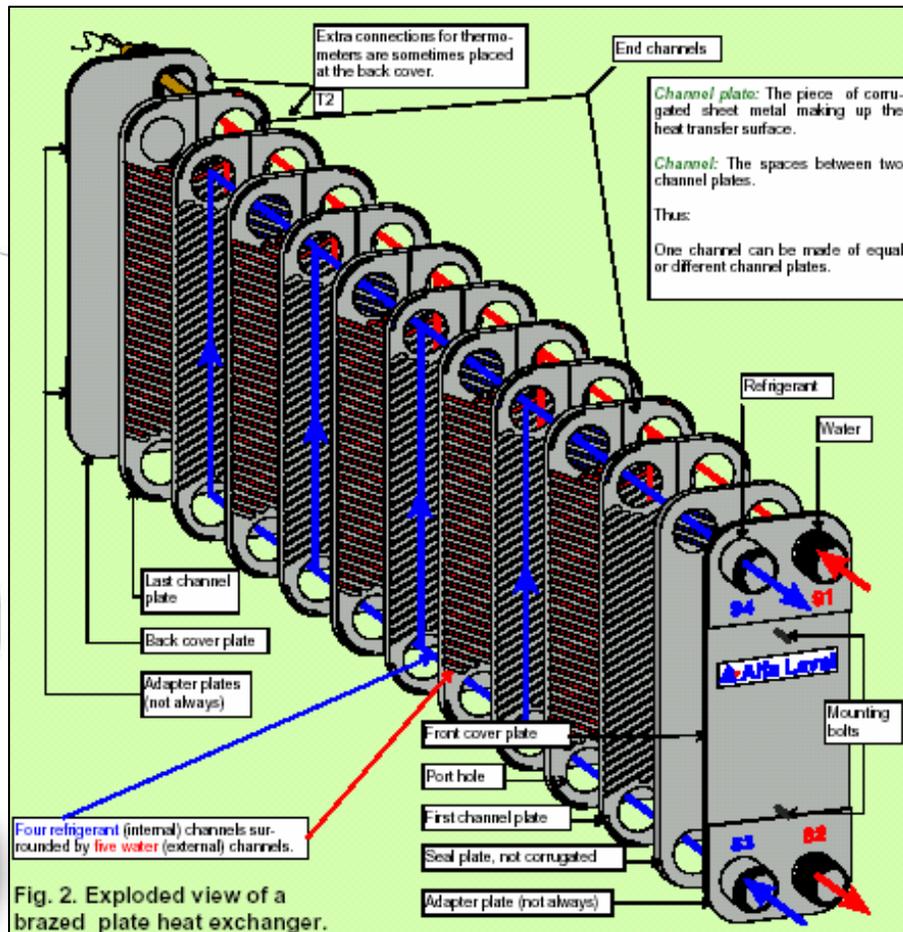
- ❖ faible encrassement (force centrifuge)
- ❖ bon échange thermique (effet de "swirl")
- ❖ démontable



► Echangeurs thermiques

Echangeurs à plaques

➔ Fonctionnement

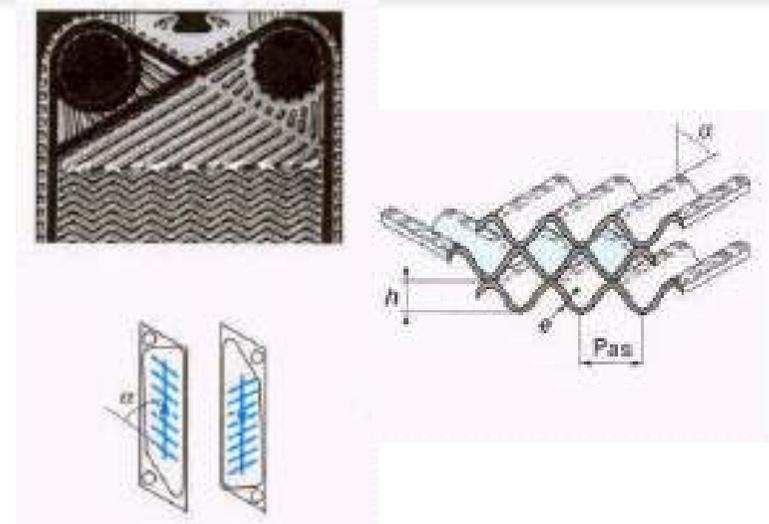


► Echangeurs thermiques

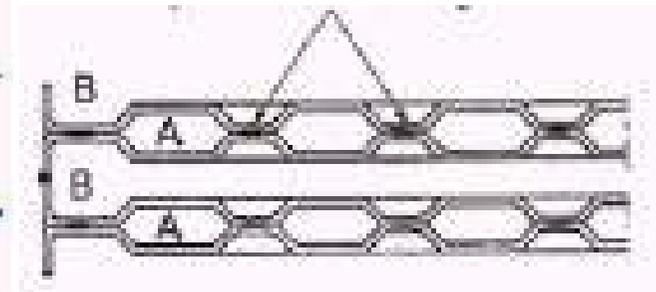
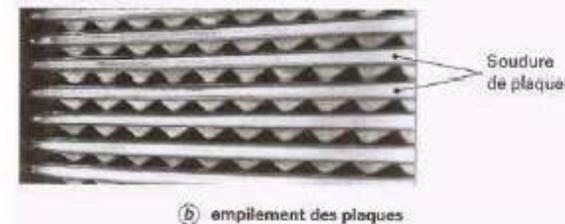
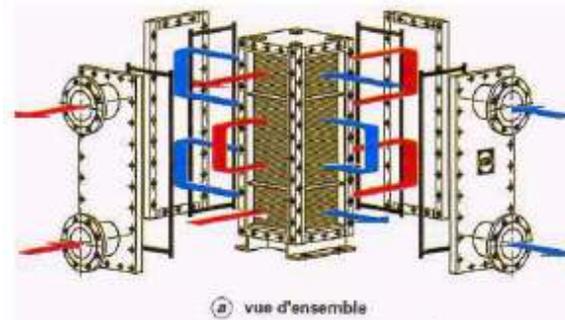
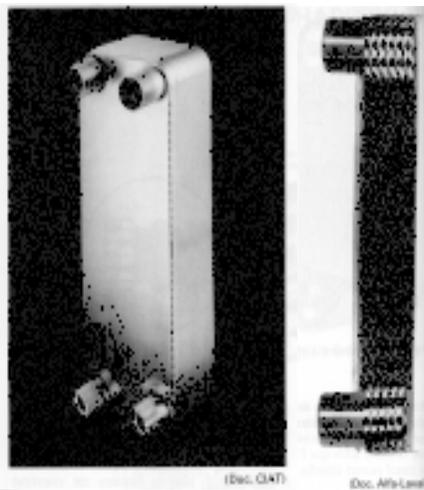
Echangeurs à plaques

⇒ Échangeurs à plaques et joints

- pression limitée (15 à 20 bars)
- température $< 150^{\circ}\text{C}$
- cannelures droites, à chevrons, ...



⇒ Échangeurs à plaques soudées ou brasées



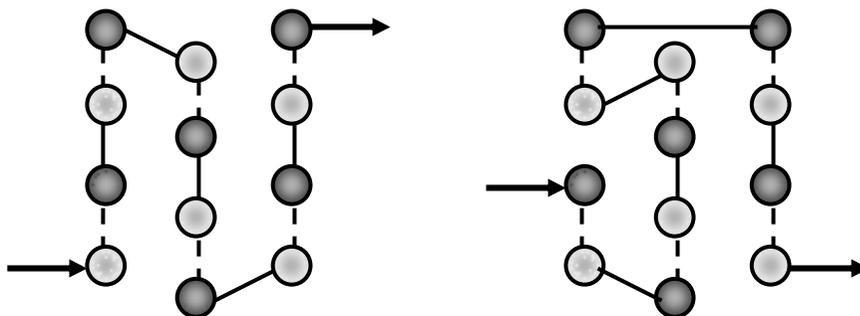
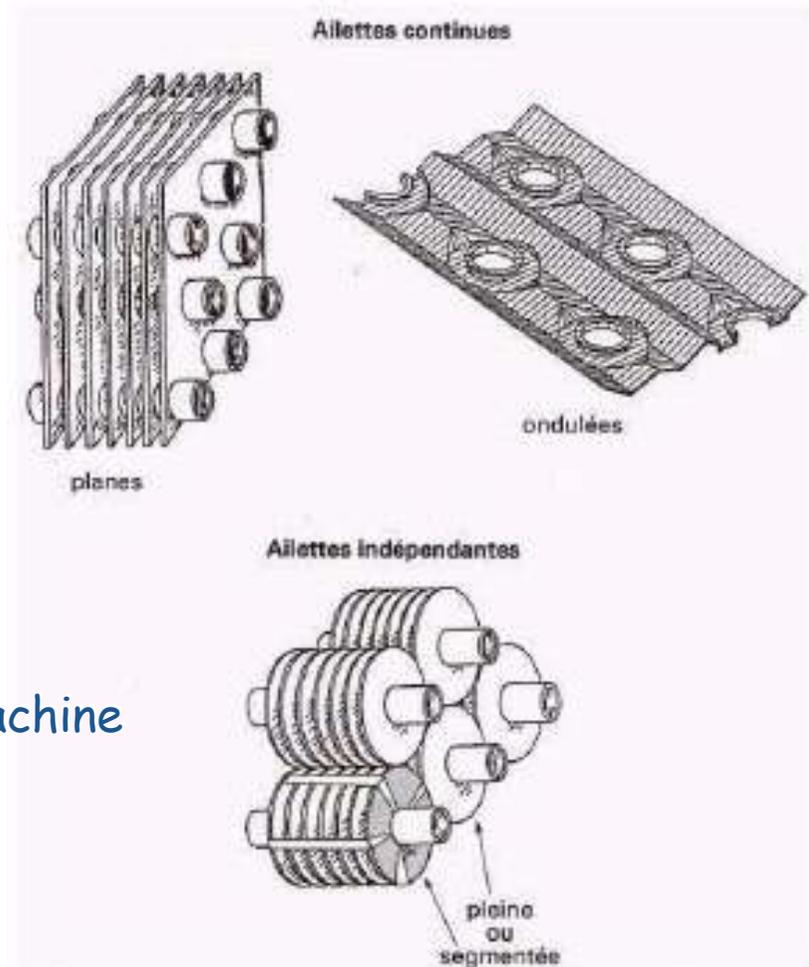
300°C
40 bars

► Echangeurs thermiques



Echangeurs en tubes et ailettes

- ⇒ Ailettes continues ou indépendantes
- ⇒ Nombre des circuits et des nappes
- ⇒ Surface externe / interne
- ⇒ Surface frontale
- ⇒ Perméabilité : SF/Surface exposée
- ⇒ Circuitage : dP , configuration de la machine

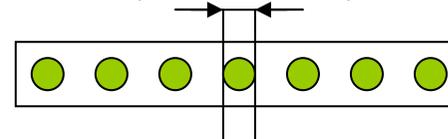


► Echangeurs thermiques

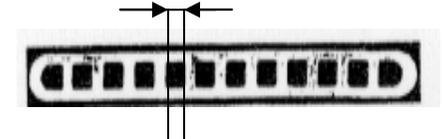


Echangeurs en mini-canaux

⇒ Mini-canaux (< 1mm) , micro-canaux (2 à 5 mm)



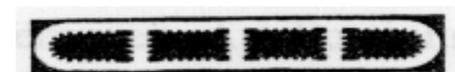
circulaires



rectangulaires



triangulaires



rectangulaires
rainurées

⇒ Avantages

- gain de poids et de compacité (aluminium) + facilité de recyclage
- réduction en quantité de fluide, en perte de charge coté air
- pressions de services élevées

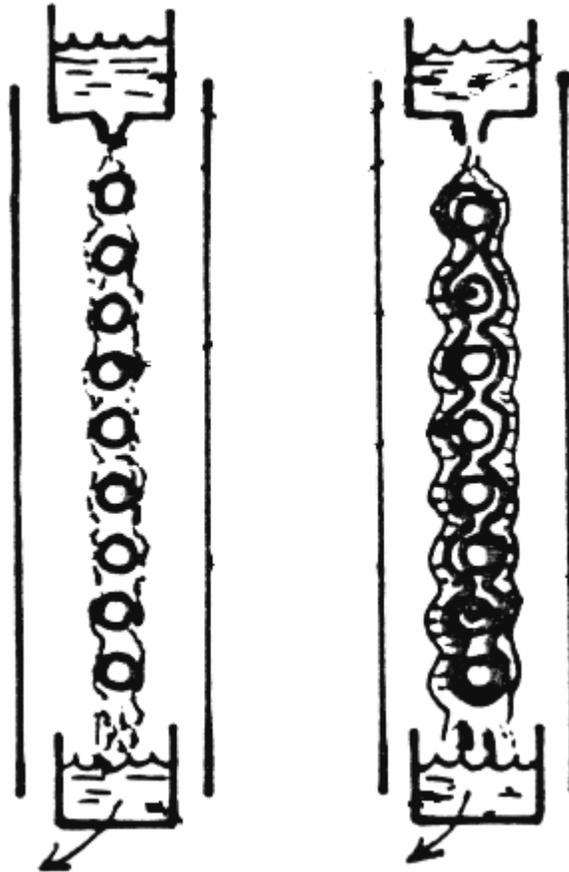
⇒ Inconvénient : prix élevé



► Echangeurs thermiques



Echangeurs à ruissellement



► Problèmes de fonctionnement



- ⇒ Encrassement : accumulation d'éléments solides indésirables en surface
 - particulière : poussière, fumée, ...
 - entartrage
 - biologique (microorganismes) ou par réaction chimique (pétrochimie)

⇒ Corrosion

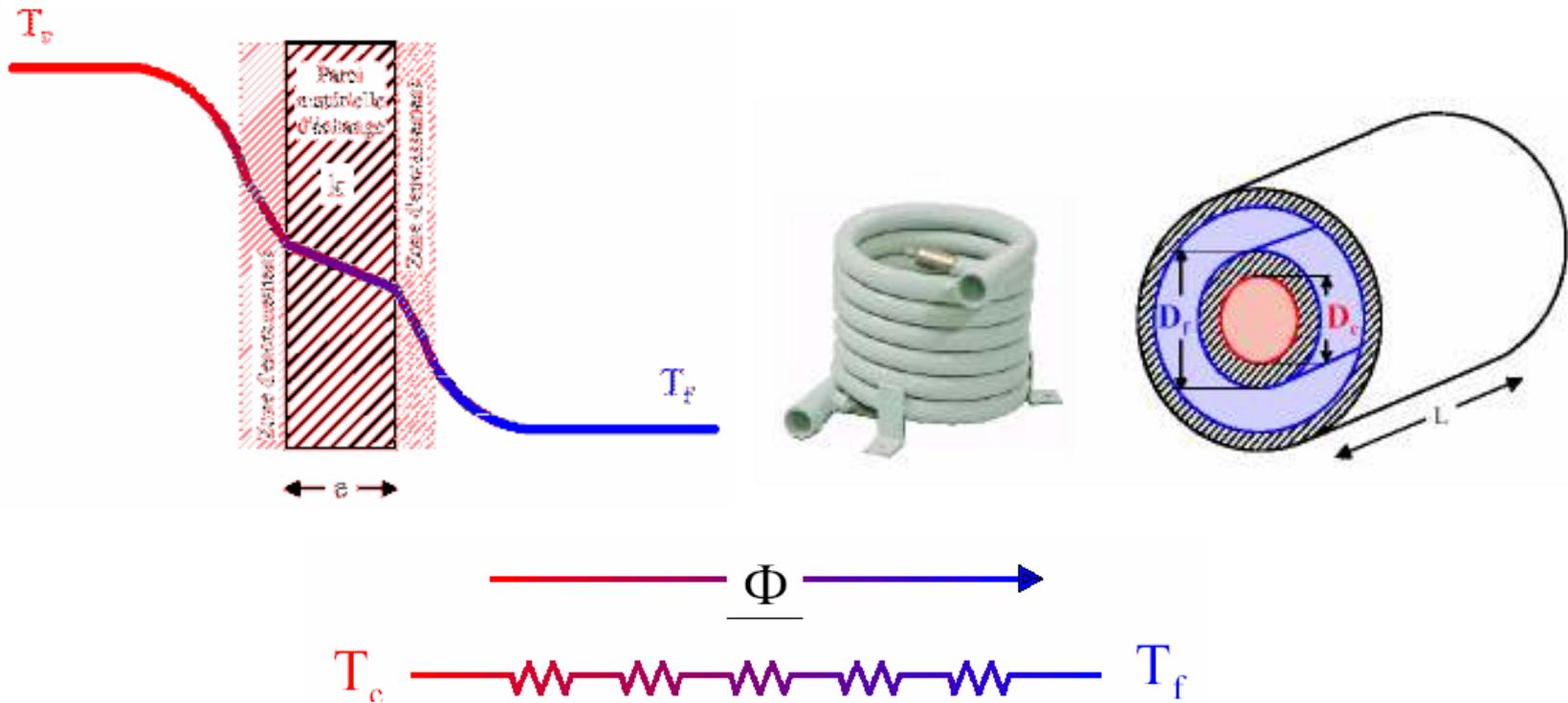
- chimique ou électrochimique, partielle ou généralisée
- contraintes mécaniques, stagnation, variation locale de T° , ...

⇒ Vibrations

- vitesse -20% de $V_{critique}$, plaques entre chicanes, ...



► Coefficient d'échange global



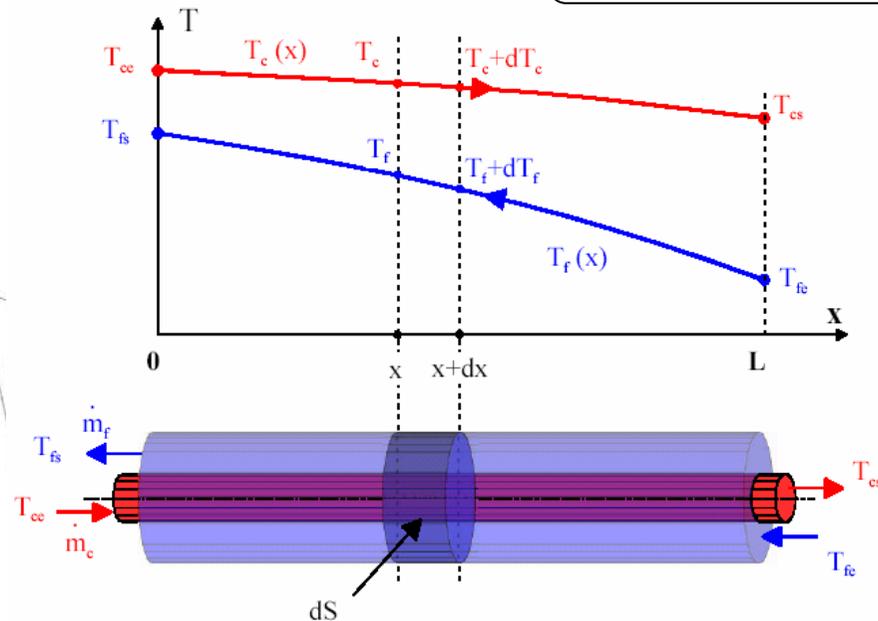
⇒ Surface de référence

- interne

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

► NUT et Efficacité

$$\dot{Q} = KS\Delta T_{LM}$$



$$\Delta T_{LM} = \frac{(T_{ce} - T_{fs}) - (T_{cs} - T_{fe})}{\ln \left(\frac{T_{ce} - T_{fs}}{T_{cs} - T_{fe}} \right)}$$

Pour améliorer la puissance :

- ➡ Action sur KS : dépend des fluides et de la géométrie
- ➡ Action sur ΔT_{LM} : efficacité

► NUT et Efficacité

- Pour un échangeur infiniment long : le fluide qui a une capacité minimum, subite la plus grande variation de température

$$\dot{Q}_{\max} = (\dot{m}c_p)_{\min} (T_{ec} - T_{ef})$$

- Efficacité :

$$E = \frac{\phi}{\phi_{\max}} = \frac{T_{ec} - T_{sc}}{T_{ec} - T_{ef}} \quad \text{ou} \quad \frac{T_{sf} - T_{ef}}{T_{ec} - T_{ef}}$$

co-courant	contre courant
$E = \frac{1 - e^{-NUT(1+R)}}{1 + R}$	$E = \frac{e^{-NUT(1-R)} - 1}{Re^{-NUT(1-R)} - 1}$

Avec :

$$NUT = \frac{KS}{C_{\min}} \qquad R = \frac{C_{\min}}{C_{\max}}$$

► NUT et Efficacité



Problème 1

$K, C_{\min}, C_{\max}, T^{\circ} \text{ e/s. } S ?$



Problème 2

$S, K, C_{\min}, C_{\max}, T^{\circ} \text{ entrée. } T^{\circ} \text{ sortie} + \dot{Q}$

Problème 1

- 1- calcul de l'efficacité
- 2- calcul de NUT
- 3- calcul de S

- 1- calcul de puissance
- 2- calcul de DTLM
- 3- calcul de S

Problème 2

- 1- calcul de NUT
- 2- calcul de l'efficacité
- 3- calcul de T° de sortie
- 4- calcul de la puissance

- 1- estimation des T° de sortie
- 2- calcul de DTLM
- 3- calcul de la puissance
- 4- déduction des T° de sortie
- 5- comparaison et itération

Problème 2 est le plus rencontré : NUT est la mieux adaptée

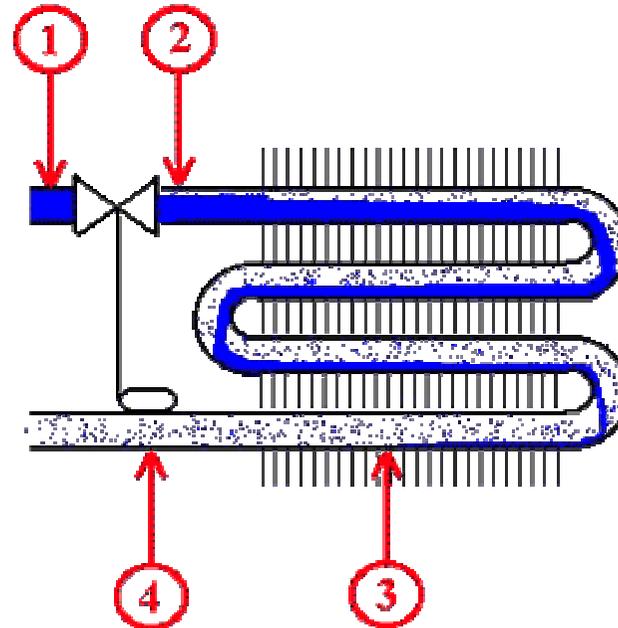


► Evaporateurs



Evaporateur à détente directe

Côté frigorigène



Point 1 : Fluide sous-refroidi

Point 2 : Fluide détendu, une partie du liquide se vaporise
Titre en vapeur : 20 à 30%

Point 3 : Disparition de la dernière goutte de liquide
Titre en vapeur 100%

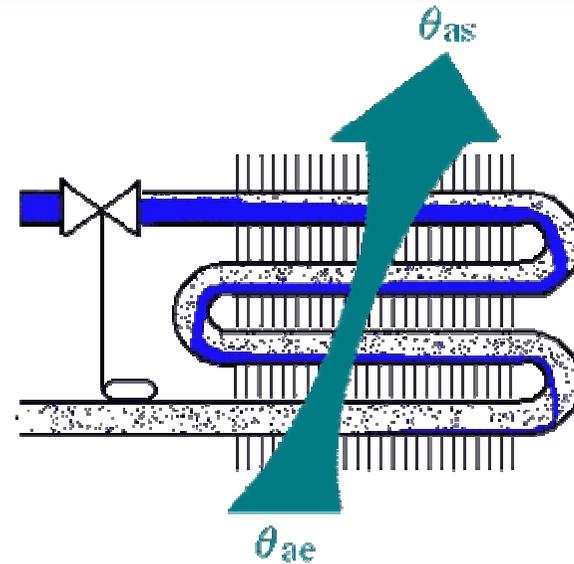
Entre 3 et 4 : zone de surchauffe



► Evaporateurs

Evaporateur à détente directe

Côté fluide secondaire



❖ Le fluide se refroidit, la différence de température dépend de l'efficacité de l'échangeur et des échanges thermiques entre le frigorigène et le fluide secondaire.

Dans beaucoup d'applications courantes, on rencontre les évaporateurs refroidisseurs d'air :

❖ En climatisation :

$$\theta_{ae} - \theta_o = 15 \text{ à } 20 \text{ K}$$

$$\Delta\theta_{es} = 6 \text{ à } 10 \text{ K}$$

❖ En froid commercial :

$$\theta_{ae} - \theta_o = 6 \text{ à } 10 \text{ K}$$

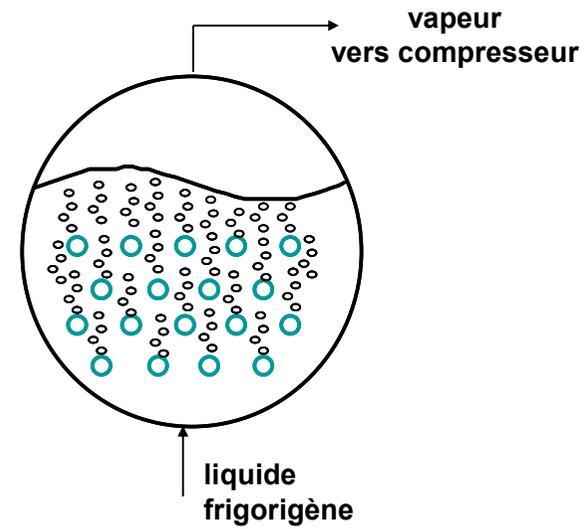
$$\Delta\theta_{es} = 3 \text{ à } 5 \text{ K}$$

► Evaporateurs

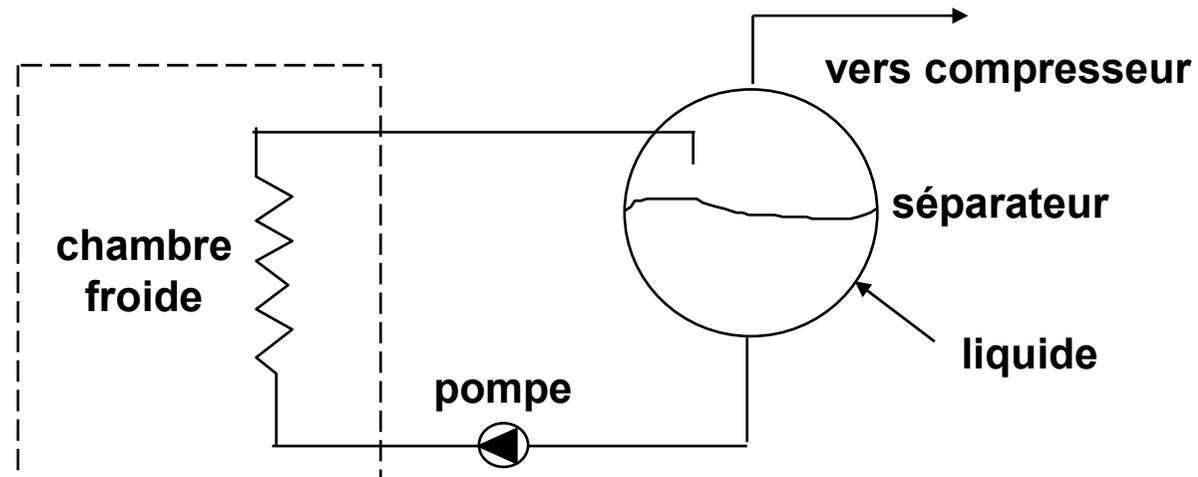


Evaporateur noyés

sans recirculation
à regorgement



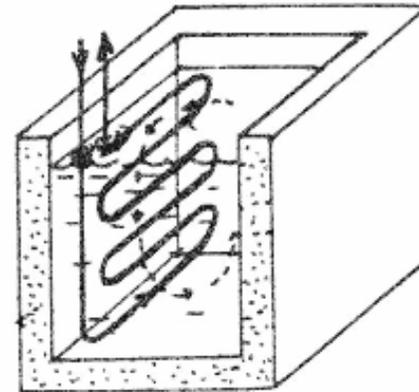
Avec recirculation



▶ Evaporateurs

Evaporateur refroidisseurs de liquide

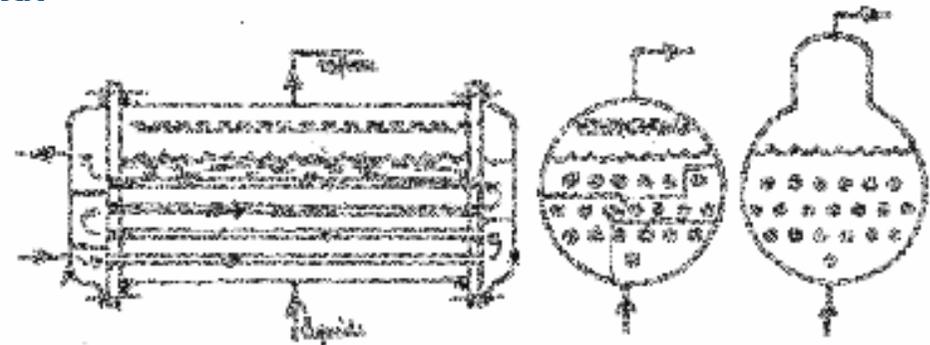
⇒ Evaporateurs à immersion



- ❖ évaporateurs les plus anciens utilisés dans le froid
- ❖ fluide frigorigène à l'intérieur des tubes, évaporateurs à surchauffe

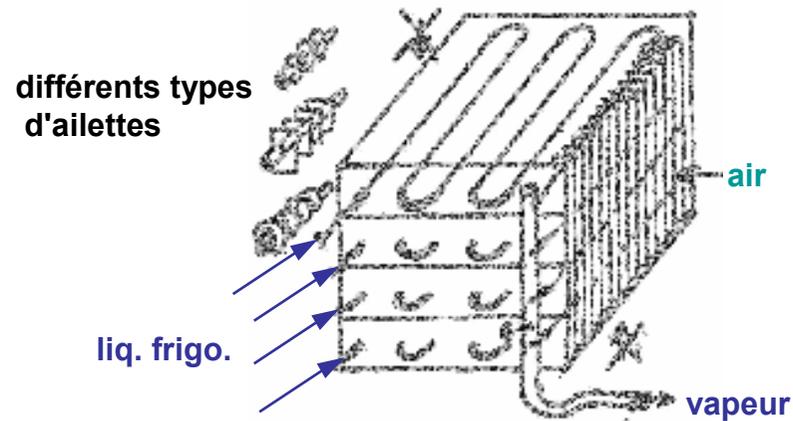
⇒ Evaporateurs multitubulaires

- ❖ fluide frigorigène à l'intérieur ou à l'extérieur,
- ❖ évaporateurs à surchauffe ou noyés



▶ Evaporateurs

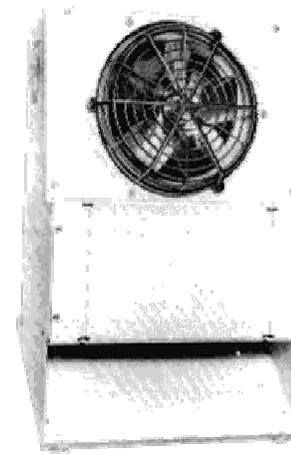
Evaporateur refroidisseurs de gaz



Evaporateur plafonnier



Evaporateur mural



► Evaporateurs



Evaporateur refroidisseurs de gaz

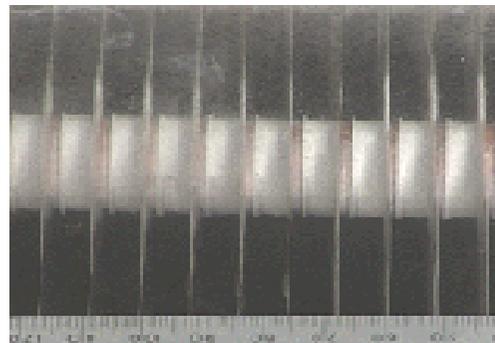
⇒ Evaporateurs pour le froid domestique



⇒ Givrage / dégivrage

Condition
d'apparition du givre

$$T_{\text{paroi}} < T_{\text{rosée}} < 0^{\circ}\text{C}$$



Procédés de dégivrage :

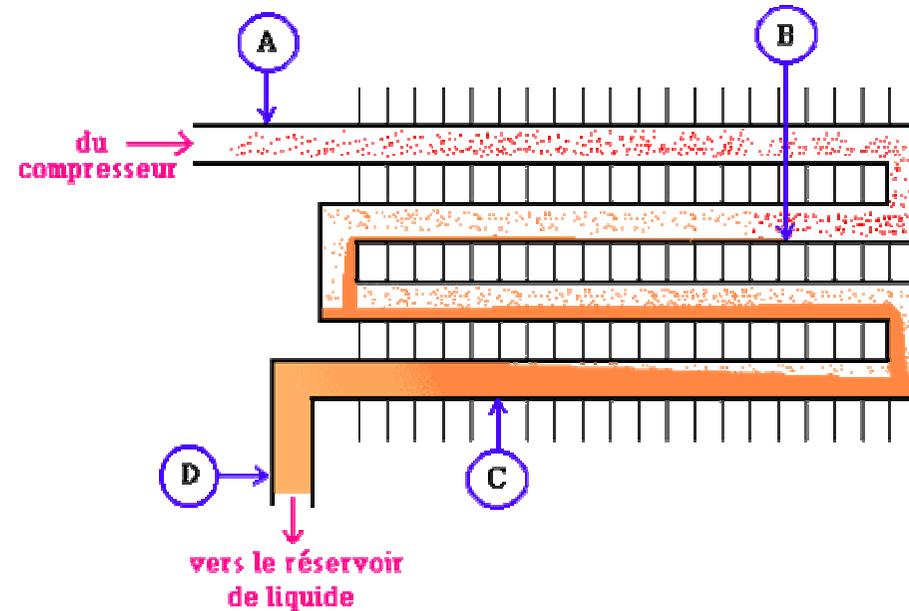
- par résistance électrique
- par gaz chauds
- par inversion de cycle



► Condenseurs

Fonctionnement d'un condenseur

Côté frigorigère



Point A : les vapeurs surchauffées entrent dans le condenseur

Point B : les vapeurs atteignent la température de condensation

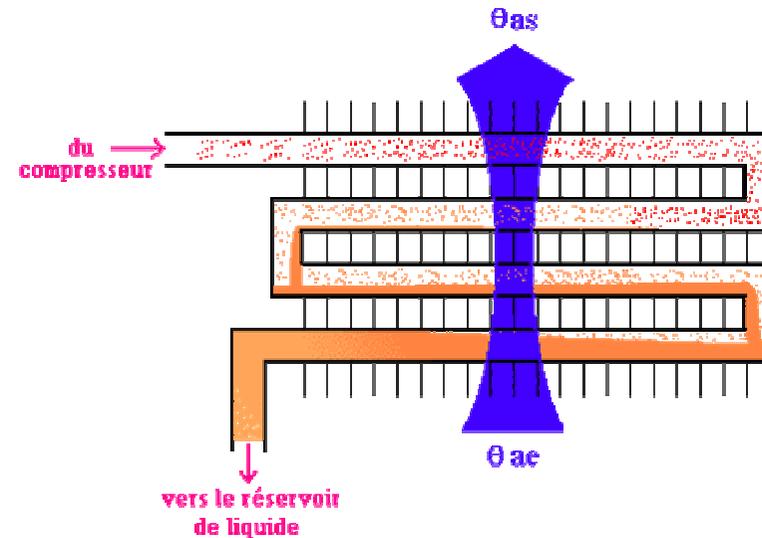
Point C : disparition de la dernière bulle de vapeur (fin de condensation)

Point D : le liquide est sous refroidi

► Condenseurs

Fonctionnement d'un condenseur

Côté fluide secondaire



❖ Le fluide se réchauffe, la différence de température dépend de l'efficacité de l'échangeur et des échanges thermiques entre le frigorigène et le fluide secondaire.

❖ Pour les condenseurs à air :

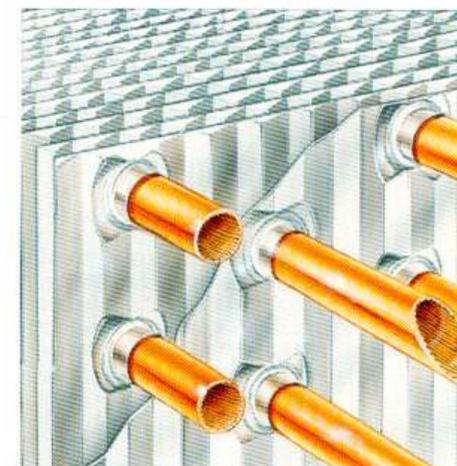
$$\theta_{ae} - \theta_o = 10 \text{ à } 20 \text{ K} \quad \Delta\theta_{es} = 5 \text{ à } 10 \text{ K}$$

❖ Pour les condenseurs à eau :

$$\theta_{ae} - \theta_o = 10 \text{ à } 20 \text{ K} \quad \Delta\theta_{es} = 5 \text{ à } 15 \text{ K}$$

► Condenseurs

Condenseurs à air



Les plus utilisés

Avantages	Inconvénients
<ul style="list-style-type: none">- gratuité de l'air- pas de risque de gel	<ul style="list-style-type: none">- échange thermique médiocre, ailettes souvent nécessaires- encombrement important- circulation d'air souvent nécessaire- température variable selon les saisons- efficacité diminue avec l'altitude- risque d'encrassement par poussière entre les ailettes

► Condenseurs

Condenseurs à eau

⇒ Condenseurs à eau verticaux

- Ils sont destinés à la construction d'armoire de conditionnement d'air et de pompe à chaleur.
- Ils offrent la possibilité de stockage du fluide frigorigène



⇒ Condenseurs tube en tube

- Ils sont constitués par deux tubes enfilés l'un dans l'autre.
- Le fluide frigorigène circule entre les deux tubes.
- Avec ce type de condenseur il faut utiliser un réservoir de liquide.



⇒ Condenseurs multitubulaires

- eau à l'intérieur des tubes
- condensation autour des tubes dans la calandre



► Condenseurs



Condenseurs à eau

Avantages

- bon échange thermique : faible encombrement
- température relativement constante dans l'année
- récupération de la chaleur cédée à l'eau aisée
- peu bruyants

Inconvénients

- forte consommation d'eau (eau perdue) coût, réglementation
- entretien et maintenance (corrosion, entartrage)
- protection contre le gel



► Condenseurs

Condenseurs évaporatifs

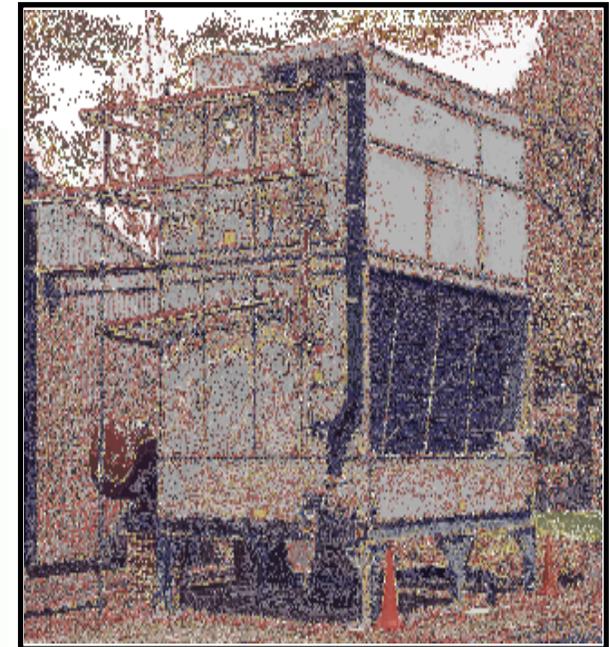
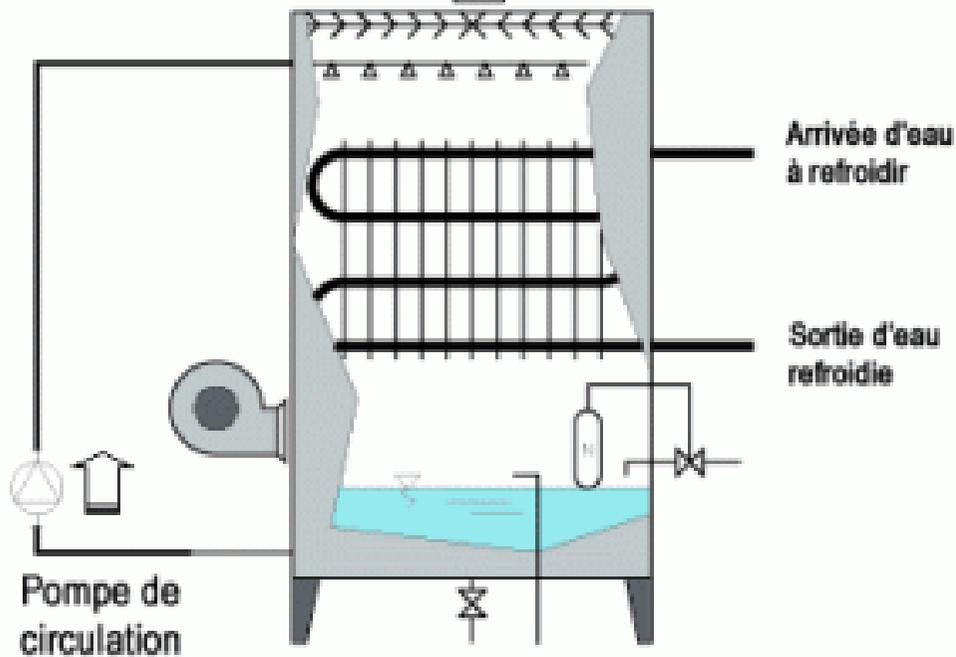
Contact air/eau



Évaporation d'une partie d'eau



Humidification d'air



► Condenseurs

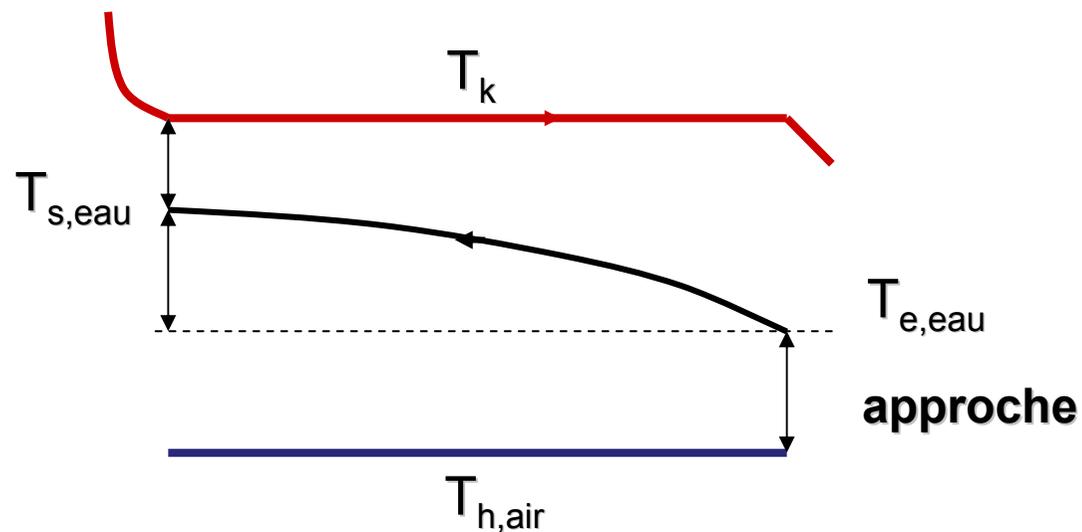
Condenseurs évaporatifs

Consommation d'eau 50 à 100 fois plus faible que pour un circuit à eau perdue

$$\Delta T_{eau} = 5 K$$

$$T_k - T_{s,eau} = 5 K$$

$$(T_{e,eau} - T_{h,air}) \left\langle \text{approche} \right\rangle \approx 3 \text{ à } 7 K$$



► Coef. d' échange K : ordre de grandeur

situation physique	Coefficient d'échange partiel en W/m ² .K
Air en convection naturelle	5-10
Air en convection forcée	30-80
Eau en convection forcée	3000-10000
HFC en évaporation à convection forcée	1000-5000
Ammoniac en évaporation	5000-10000
HFC en condensation à convection forcée	1000-3000

Type d'échangeur	Caractéristiques géométriques	Coefficient global d'échange (W/m ² .K)
Évaporateur à plaques	Largeur entre plaques : 2 mm	1250
Condenseur à plaques	Largeur entre plaques : 2 mm	2400
Évaporateur intra-tubulaire	Diamètre des tubes	
	9 mm	1400
	7 mm	1450
	4 mm	1500
Condenseur intra-tubulaire	Diamètre des tubes	
	9 mm	1100
	7 mm	1150
	4 mm	1200
Condenseur extra-tubulaire	Tube lisse de diamètre 15 mm	1700
	Tube à ailettes de D = 15 mm	3500

► Récapitulatif

Technologie d'échangeur	Critères d'utilisation	Avantages de la technologie	Limites de la technologie
Condenseur extratubulaire	<ul style="list-style-type: none"> • tous fluides (HFC, NH3) avec des réserves sur les mélanges zéotropes • eau industrielle, eau de tour • de 100 kW à plusieurs MW 	<ul style="list-style-type: none"> • Pas de perte de pression sur le fluide frigorigène • Maîtrise du sous refroidissement du condensat (par noyage des rangées inférieures des tubes) • Assure la fonction de bouteille haute pression • Nettoyage aisé des tubes (en cas d'encrassement par l'eau) 	<ul style="list-style-type: none"> • Impose des charges de fluides frigorigène importante • Nécessite une construction de la calandre pour une pression élevée • Mal adapté aux fluides zéotrope • Nécessite l'utilisation systématique de tubes à ailettes intégrales en paroi externe pour tous les HFC
Condenseur intratubulaire	<ul style="list-style-type: none"> • tous fluides (HFC, NH3) • eau industrielle, eau de tour • de 100 kW à plusieurs MW 	<ul style="list-style-type: none"> • Charge de fluide frigorigène limitée • Construction de la calandre à la pression du fluide frigoporteur (faible pression) • Adaptée à tous les fluides y compris les mélanges zéotropes 	<ul style="list-style-type: none"> • Perte de pression élevée sur le fluide frigorigène • Nettoyabilité réduite du coté fluide de refroidissement • Implique parfois l'emploi d'une bouteille haute pression
Evaporateur intratubulaire	<ul style="list-style-type: none"> • tous avec huiles miscibles • eau glycolée ou autres • de 100 kW à 1 MW 	<ul style="list-style-type: none"> • Charge de fluide frigorigène limitée • Bon coefficient de transfert • Construction de la calandre à la pression du fluide frigoporteur (faible pression) 	<ul style="list-style-type: none"> • Perte de pression élevée sur le fluide frigorigène • Nettoyabilité faible du faisceau de tubes (coté calandre) • Criticité de la distribution du fluide frigorigène à l'entrée de l'évaporateur (limitation en puissance) • Ne peut convenir à des fluides frigorigènes et huiles non miscibles (cas fréquents rencontrés avec l'ammonia)
Evaporateur noyé	<ul style="list-style-type: none"> • tous fluides y compris avec huile non miscible (NH3) avec une restriction sur les mélanges zéotropes • eau glycolée, saumure... • de 1 à plusieurs MW 	<ul style="list-style-type: none"> • Perte de pression faible sur le fluide frigorigène • Bonne nettoyabilité des tubes sur le fluide frigoporteur • Pas de difficulté de la distribution du fluide frigorigène à l'entrée de l'évaporateur (pas de limitation en puissance) • Peut convenir à des fluides frigorigènes et huiles non miscibles 	<ul style="list-style-type: none"> • Charge de fluide frigorigène élevée • Médiocre coefficient de transfert (nécessité de tubes améliorés) • Construction de la calandre à la pression du fluide frigorigène (forte pression) • Peut très difficilement s'adapter aux mélanges zéotropes

► Récapitulatif

Technologie d'échangeur	Critères d'utilisation	Avantages de la technologie	Limites de la technologie
Batterie à ailettes Condenseur ou évaporateur	<ul style="list-style-type: none"> ▪ tous fluides ▪ de quelques centaines de W à plusieurs MW 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Très grande souplesse d'utilisation ▪ Impose des faibles charges de fluide frigorigène 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Pertes de pression élevée sur le fluide frigorigène ▪ Difficulté de l'équilibrage des circuits parallèle de fluide frigorigène ▪ Adaptation délicate aux mélanges zéotropes
Echangeur coaxiaux Condenseur ou évaporateur	<ul style="list-style-type: none"> ▪ tous fluides frigorigènes y compris NH3 (si les matériaux des tubes sont adaptés) ▪ eau, eau glycolée, saumure ▪ de quelques kW à moins de 100 kW 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Bon coefficient de transfert ▪ Adapté aux fluides HFC y compris aux mélanges zéotropes de type R407C (circulation parallèle) 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Encombrement important de l'appareil ▪ Domaine d'application limité aux faibles et moyennes puissances (<80 kW) ▪ Perte de pression élevée sur le fluide frigorigène
Echangeur à plaques brasées Condenseur ou évaporateur	<ul style="list-style-type: none"> ▪ tous fluides frigorigènes de type HFC ▪ Eau, eau glycolée (pas adaptée au saumure) ▪ de quelques kW à environ 500 kW 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Compacité élevée et volume réduit de l'échangeur ▪ Impose des charges de fluide frigorigène très faible ▪ Bon coefficient de transfert ▪ Adapté aux fluides HFC y compris aux mélanges zéotropes de type R407C de par la circulation en parallèle des fluides 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Pertes de pression élevée sur le fluide frigorigène ▪ Nettoyage délicat des canaux (en cas d'encrassement par l'eau) ▪ Fragilité de l'appareil (en cas notamment de gel du fluide frigoporteur dans l'évaporateur) ▪ Nécessité de régulation adaptée pour le détendeur (temps de réponse élevée) de par la faible inertie de l'appareil) ▪ Ne convient pas à l'ammoniac dans sa version la plus courante (brasure cuivre). Des versions adaptées à l'ammoniac existent toutefois sur le marché.