

# P 31 LES ÉCHANGEURS DE CHALEUR

DECLAYE Sébastien  
GENDEBIEN Samuel  
LEMORT Vincent

Université  
de Liège



THE THERMODYNAMICS  
LABORATORY

UNIVERSITY of LIÈGE

# Contenu de la présentation

---

- Introduction
- Principe de base des échangeurs de chaleur
- Classification des échangeurs
- Exemples de réalisations pratiques

# Contenu de la présentation

---

- Introduction
- Principe de base des échangeurs de chaleur
- Classification des échangeurs
- Exemples de réalisations pratiques

# Introduction

---

- Echangeur de chaleur = élément clef des systèmes énergétiques
  - ✓ Dispositif qui permet le transfert de chaleur d'un fluide à un autre sans les mélanger. Le flux thermique traverse la surface d'échange qui sépare les deux fluides.
  - ✓ Domaine d'application très large (HVAC, procédé industriel, secteur bâtiment, chimie, récupération d'énergie thermique, réfrigération, centrales de production d'électricité,...)
  - ✓ Dans des procédés industriels, 90% de l'énergie thermique transite au moins une fois dans un échangeur de chaleur (dans le procédé lui-même et lors de la valorisation de la chaleur du procédé)
  - ✓ Toutes les machines thermodynamiques fermées comportent au moins 2 échangeurs de chaleur (machines frigorifiques, cycle de Rankine)
  - ✓ Différents types d'échangeur de chaleur en fonction de l'application et du procédé considéré

# Contenu de la présentation

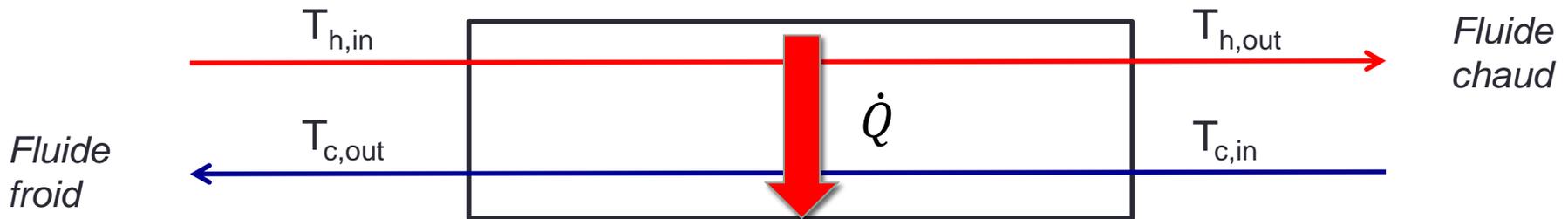
---

- Introduction
- Principe de base des échangeurs de chaleur
- Classification des échangeurs
- Exemples de réalisations pratiques

# Principes de base des échangeurs

## Définition

- Dispositif qui transfère de l'énergie thermique d'un fluide chaud (h) vers un autre fluide froid (c)



- Généralement, pas de transfert de masse entre les fluides:
  - Afin d'éviter contamination d'un fluide par le deuxième
  - En présence de fluides à des pressions différentes
  - Exception: échangeurs enthalpiques (échange de chaleur dit « total » sensible+latent), échangeurs rotatifs, tours de refroidissement
- Mode de transfert de chaleur: la chaleur est transférée par convection, conduction et rayonnement

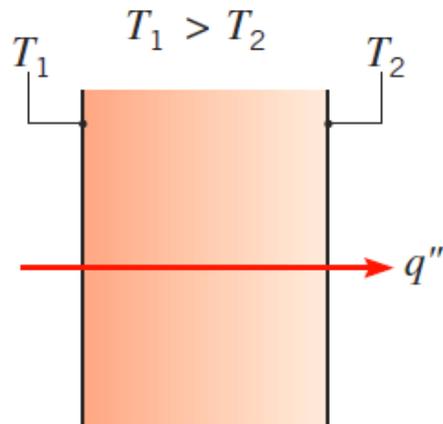
# Principes de base des échangeurs

## *Modes de transfert de chaleur*

- 3 modes de transfert de chaleur

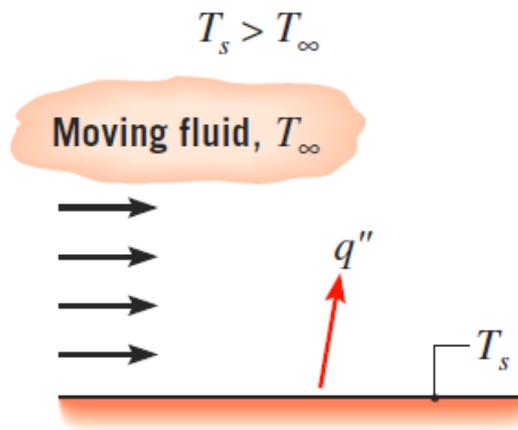
### Conduction

Conduction through a solid or a stationary fluid



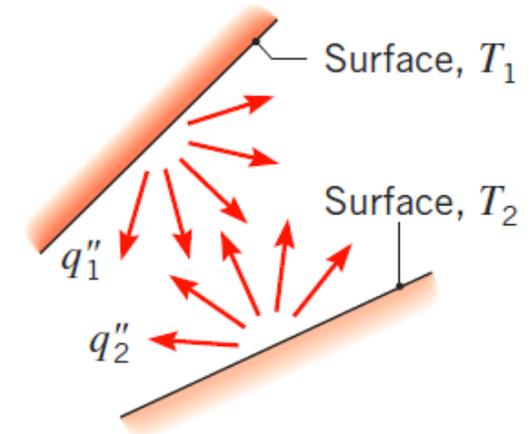
### Convection

Convection from a surface to a moving fluid



### Radiation

Net radiation heat exchange between two surfaces



# Principes de base des échangeurs

## *Performance*

---

### Caractérisation thermodynamique d'un échangeur de chaleur

- **Performance thermique:**

- Efficacité thermique de l'échangeur:  $\epsilon$  [%]
- Traduit la capacité de l'échangeur à transférer les calories d'un fluide à un autre
- Valeur à maximiser

- **Performance hydraulique/aéraulique:**

- Pertes de charge liés au passage d'un fluide dans l'échangeur:  $\Delta P$  [Pa]
- Correspond à la dissipation par frottements de l'énergie d'un fluide en mouvement sous forme de chaleur
- Intervient dans la consommation des auxiliaires
- Valeur à minimiser

Compromis à trouver entre performance hydraulique et thermique

# Principes de base des échangeurs

## *Performance*

---

- Performance thermique:

- On cherche à maximiser la puissance thermique transférable
- Dépend du coefficient de transfert de chaleur global  $AU$  [W/K] (à maximiser), qui est le produit de l'aire de la surface d'échange  $A$  [m<sup>2</sup>] et du coefficient d'échange  $U$  [W/m<sup>2</sup>-K]

$$\dot{Q} = A \cdot U \cdot \Delta T_{lm}$$

$$U = \frac{1}{h_h} + \frac{e}{k} + \frac{1}{h_c}$$

- $U$  dépend du coefficient d'échange convectif côté fluide chaud  $h_h$  et côté fluide froid  $h_c$  [W/m<sup>2</sup>-K], de la conductivité thermique de la paroi  $k$  [W/m-K] et de l'épaisseur de la paroi  $e$  [m]
- La différence de température moyenne entre les fluides

# Principes de base des échangeurs

## *Performance*

---

- Performance **hydraulique** caractérisée par la perte de charge
  - Minimisation des pertes de charge (pertes pression) subies par chacun des fluides (réduction de la consommation des auxiliaires assurant la circulation des fluides dans l'échangeur)
  - Pertes de charge et efficacité sont liées ⇒ Design d'un échangeur résulte souvent en un compromis entre pertes de charge et efficacité

$$\Delta p = f \cdot \frac{\rho u_m^2}{2D_h} \cdot L$$

- f le coefficient de friction qui dépend des conditions d'écoulement (laminaire, turbulent, transitoire), de la géométrie, de la rugosité, etc... Déterminé au moyen de corrélations.
- $\rho$  la densité du fluide,
- $u_m$  la vitesse moyen d'écoulement du fluide,
- L la longueur d'écoulement du fluide,
- $D_h$  le diamètre hydraulique de la conduite

# Contenu de la présentation

---

- Introduction
- Principe de base des échangeurs de chaleur
- Classification des échangeurs
- Exemples de réalisations pratiques

# Classification des échangeurs

---

- Etat thermodynamique des fluides (air/air, air/liquide,...): écoulement monophasique, diphasique, vaporisation, condensation...
- Compacité (surface d'échange/volume de l'échangeur). Un échangeur est considéré compact si  $A_{hx} > 700 \text{ [m}^2/\text{m}^3\text{]}$ : présence d'ailettes
- Configuration des écoulements (courants parallèles, contre-courants, courants croisés, multi-passes,...)
- Types de construction/technologies: échangeurs tubulaires, à plaques, ailettes, plastique, thermoformé, aluminium, multipasses, passe simple...
- Mécanisme de transfert de chaleur: convection forcée ou naturelle, rayonnement, contact direct et indirect...

# Classification des échangeurs

## *Etat thermodynamique des fluides*

---

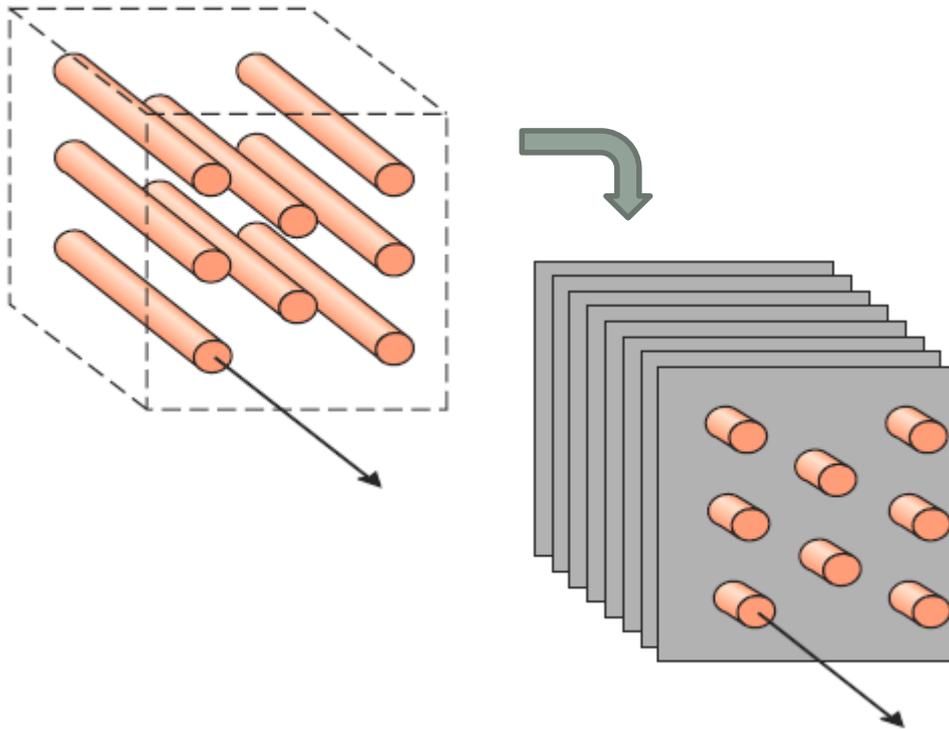
- Les fluides peuvent être à l'état liquide, gazeux ou diphasique (changement de phase liquide-vapeur)
- Exemples:
  - Eau liquide – Air:  
Radiateur, tour de refroidissement,...
  - Eau liquide – Eau:  
Découplage entre deux circuits hydrauliques, ballon d'eau chaude sanitaire,...
  - Air - Réfrigérant (diphasique):  
Condenseur et évaporateur à air sur machines frigo,...
  - Eau liquide – Réfrigérant (diphasique):  
Condenseur de machines frigos sur géothermie ...
  - Huile – Air:  
Refroidisseur d'huile,...
  - Air – Air:  
Récupération de chaleur sur ventilation, récupérateur pour turbines à gaz,...

# Classification des échangeurs

## *Compacité*

- Pour un volume donné (contrainte géométrique définie), augmentation de la surface d'échange et donc du transfert thermique

Présence d'ailettes



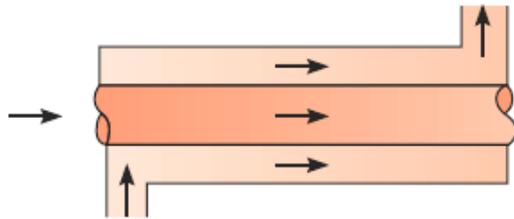
Echangeur à plaques corruguées



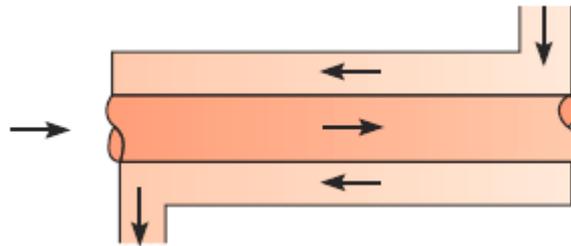
# Classification des échangeurs

## Configuration des écoulements

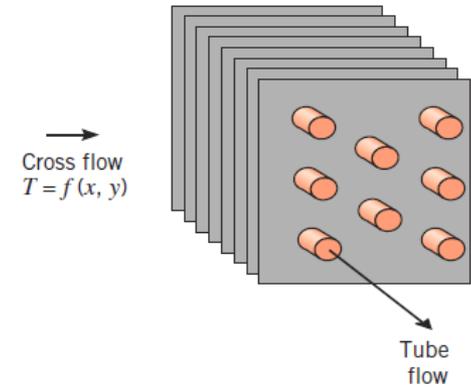
Courant parallèle



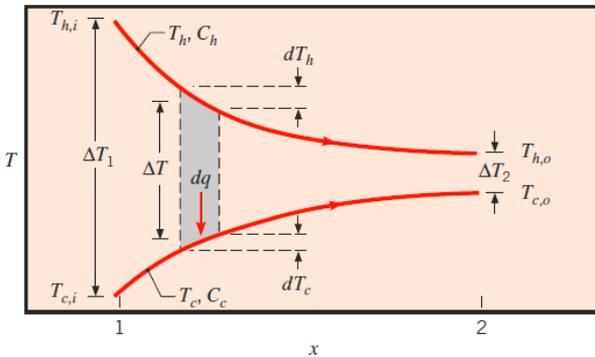
Courant contre courant



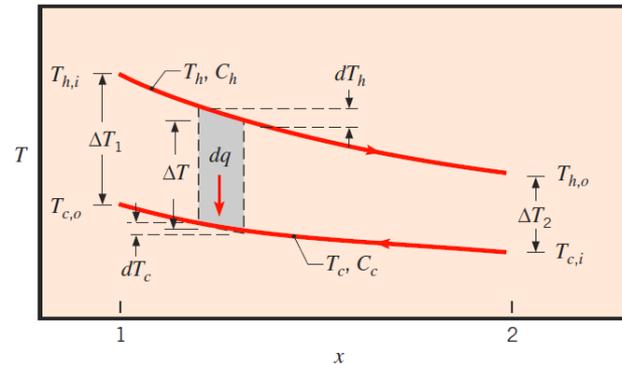
Courant croisé



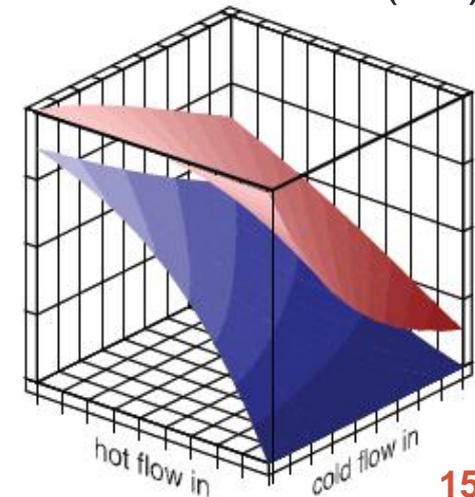
Evolution de  $T^\circ$



Evolution de  $T^\circ$



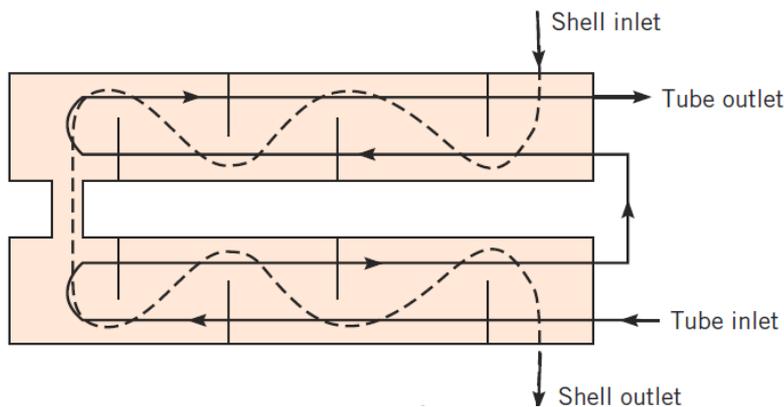
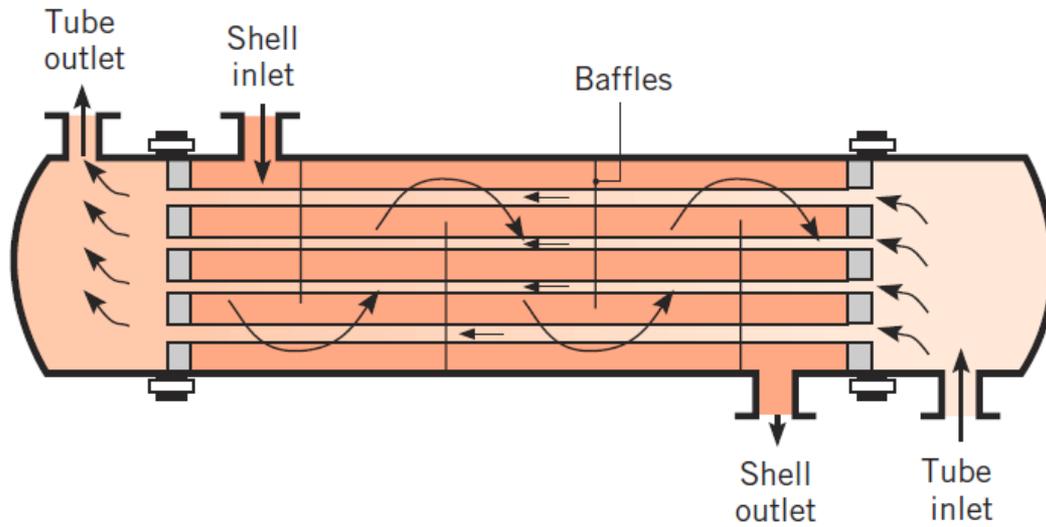
Evolution de  $T^\circ$  (2D)



# Classification des échangeurs

## *Types de construction/technologies*

### ➤ Echangeurs tubes et calandres

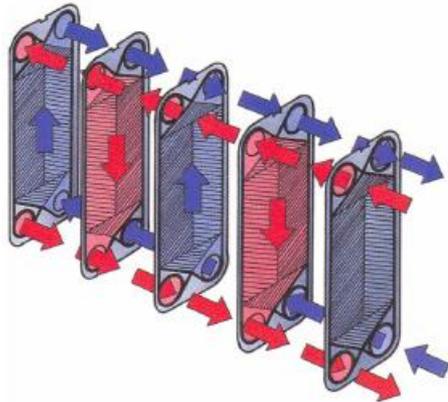


➤ Une ou plusieurs passes par échangeur

# Classification des échangeurs

## *Types de construction/Technologies*

### ➤ Echangeurs à plaques

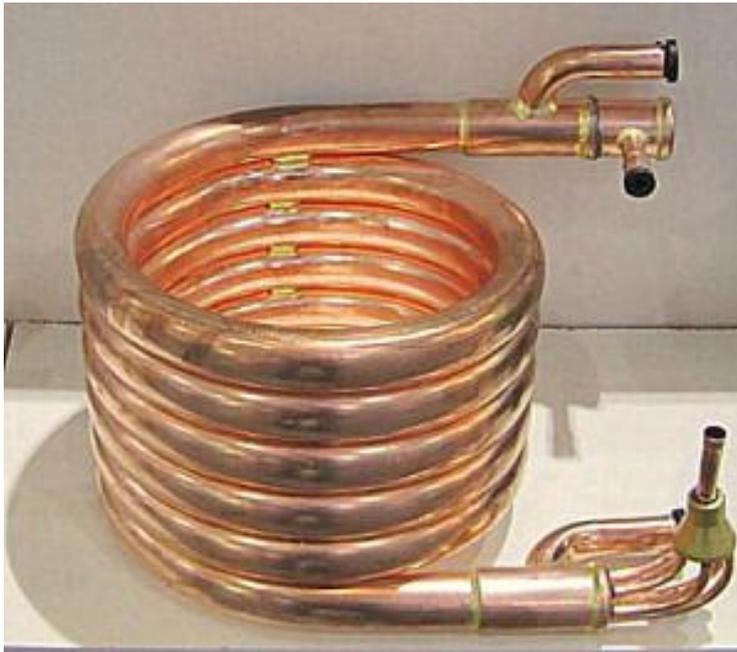


- Plaques et joints ou plaques brasées
- Faible charge de fluide
- Configuration des plaques+ petit diamètre hydraulique => grande valeur de AU (! Pertes de charge!)
- Haute compacité

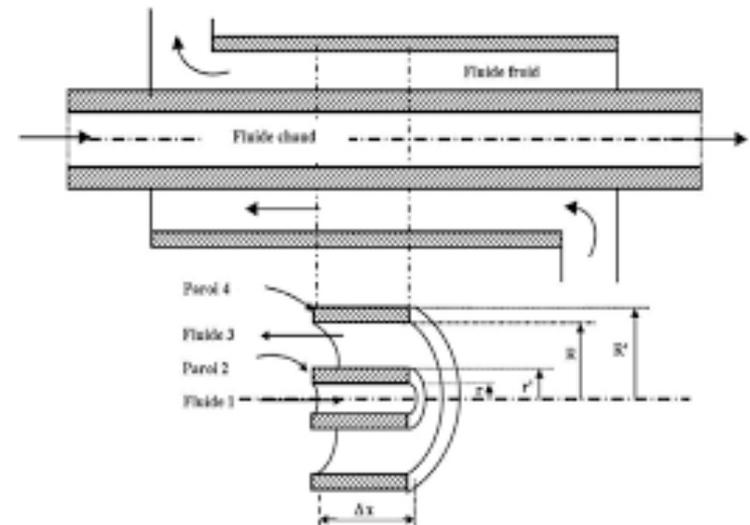
# Classification des échangeurs

## *Technologies*

### ➤ Echangeurs co-axiaux



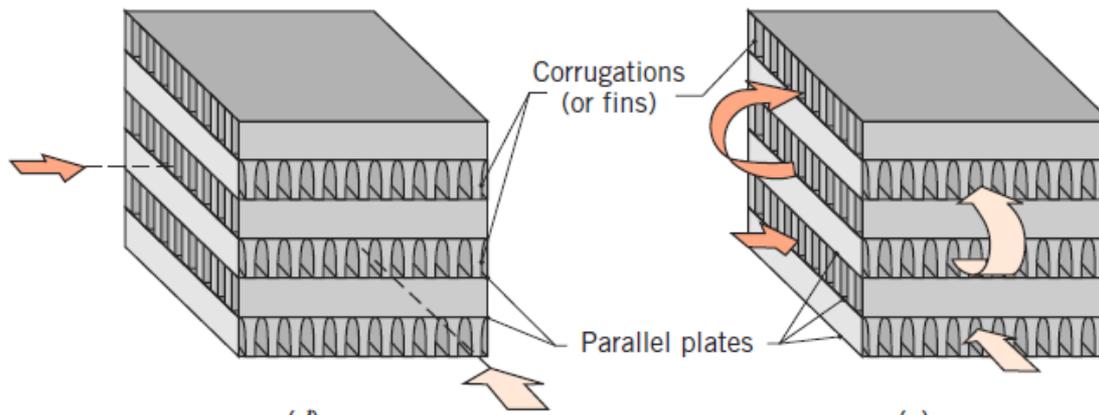
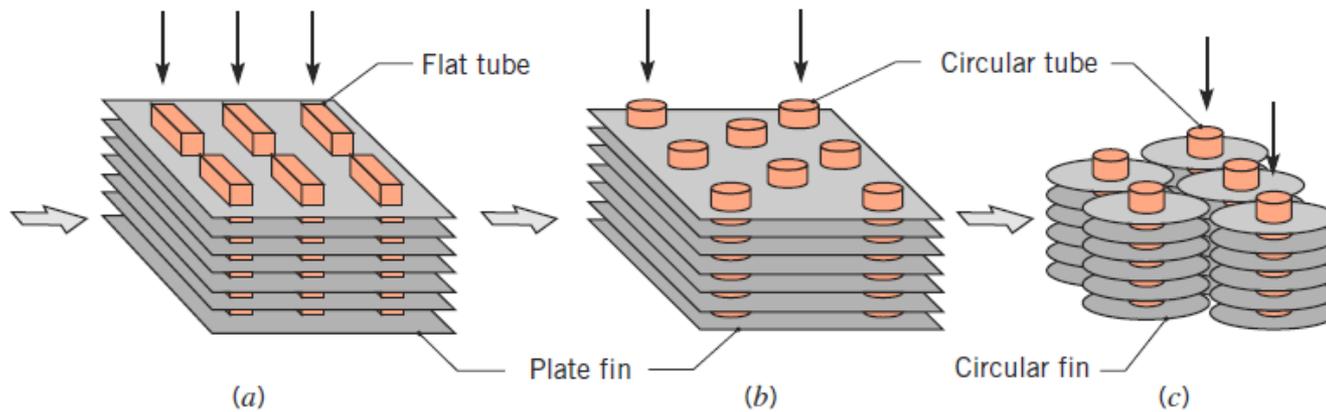
Tubes avec des ailettes internes pour augmenter la surface d'échange



# Classification des échangeurs

## Technologies

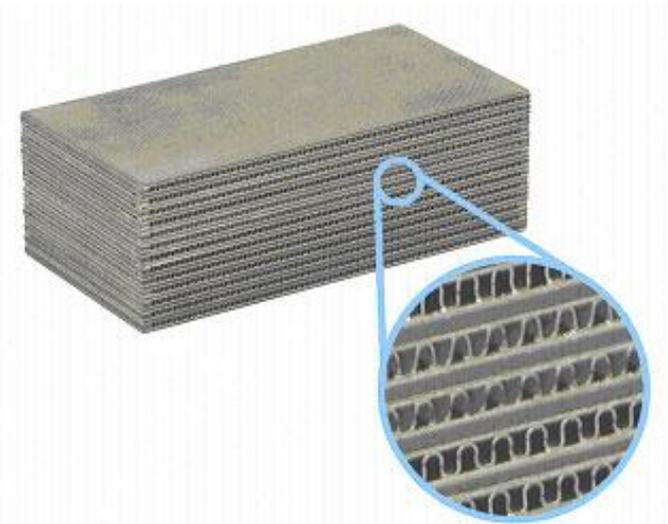
### ➤ Echangeurs à ailettes



# Classification des échangeurs

## *Technologies*

### ➤ Echangeurs à ailettes



# Contenu de la présentation

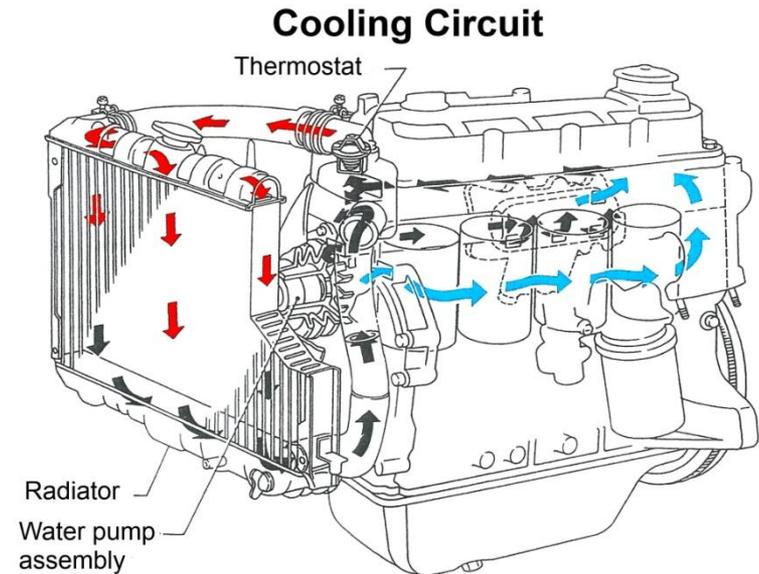
---

- Introduction
- Principe de base des échangeurs de chaleur
- Classification des échangeurs
- Exemples de réalisations pratiques

# Exemples de réalisations pratiques

## *Radiateur de voiture*

- Fonction: évacuation dans l'atmosphère de la chaleur du moteur accumulée par le liquide de refroidissement. Refroidissement du fluide caloporteur au moyen d'air froid venant de l'ambiance (vitesse du véhicule ou ventilateur)

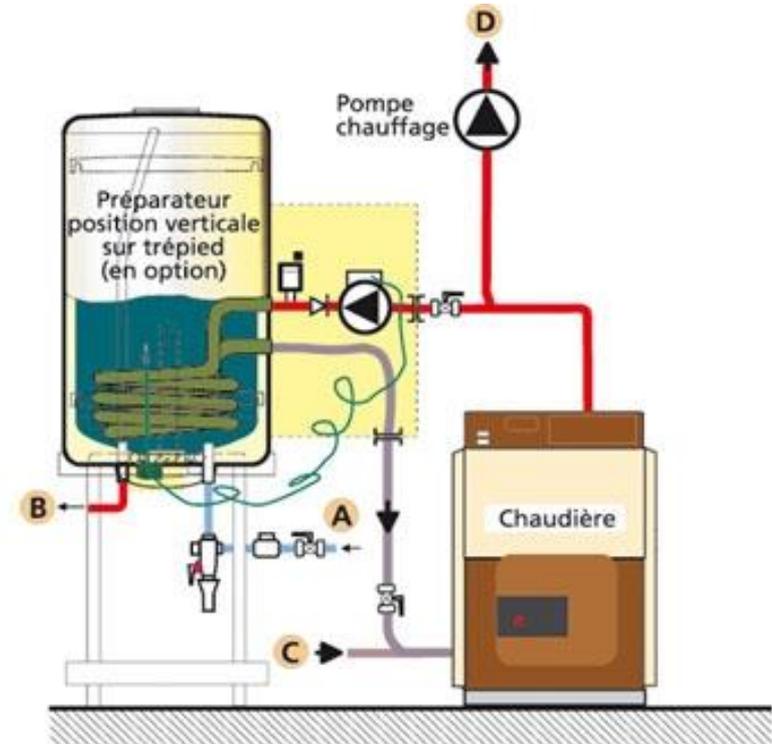
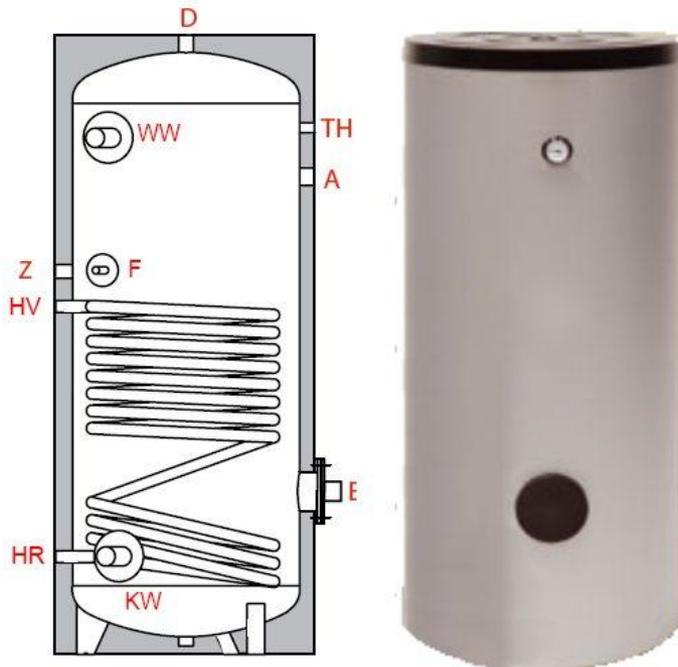


- Echangeur à tubes et ailettes pour augmenter la surface d'échange et donc l'efficacité thermique de l'échangeur
- Le plus souvent en aluminium

# Exemples de réalisations pratiques

## *Ballon d'eau chaude sanitaire*

- Fonction: échange de la chaleur entre la chaudière (gaz, fuel) et le ballon de stockage d'eau chaude sanitaire via circuit secondaire.

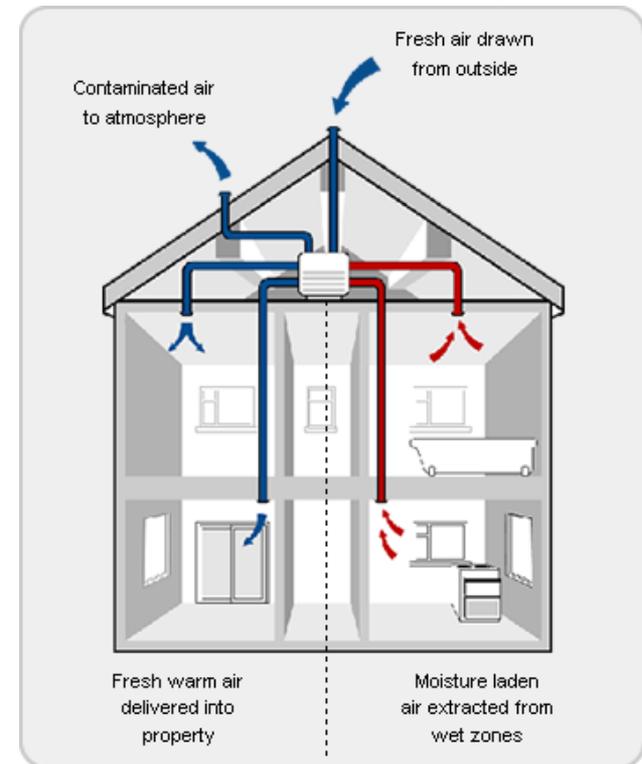
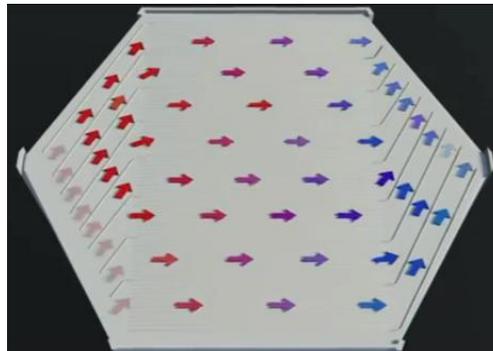
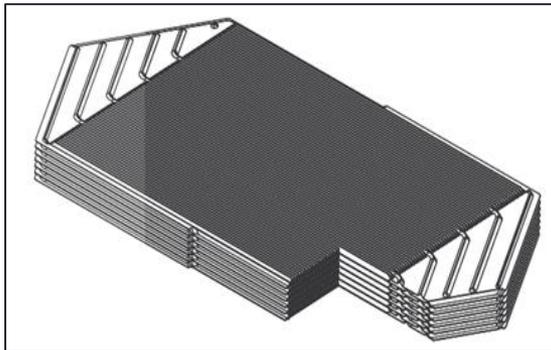


- Echangeur dit « tubulaire »
- Isolation du ballon pour éviter les pertes à l'ambiance

# Exemples de réalisations pratiques

## *Ventilation mécanique centralisée avec récupération de chaleur*

- Fonction: échange de la chaleur entre l'air vicié (extrait du bâtiment) et l'air frais (pulsé) dans le bâtiment

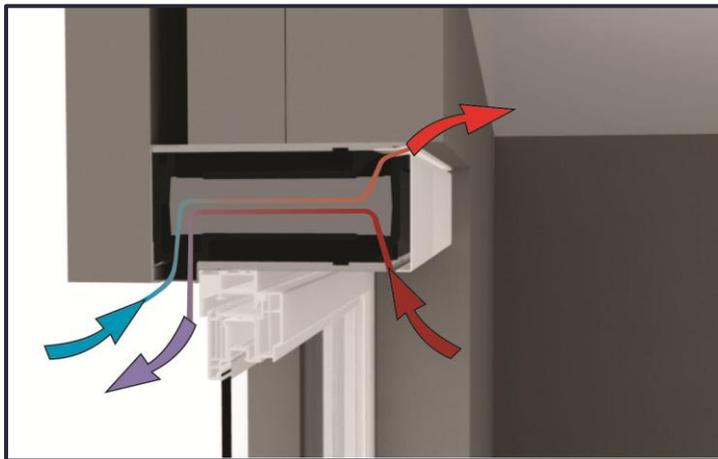
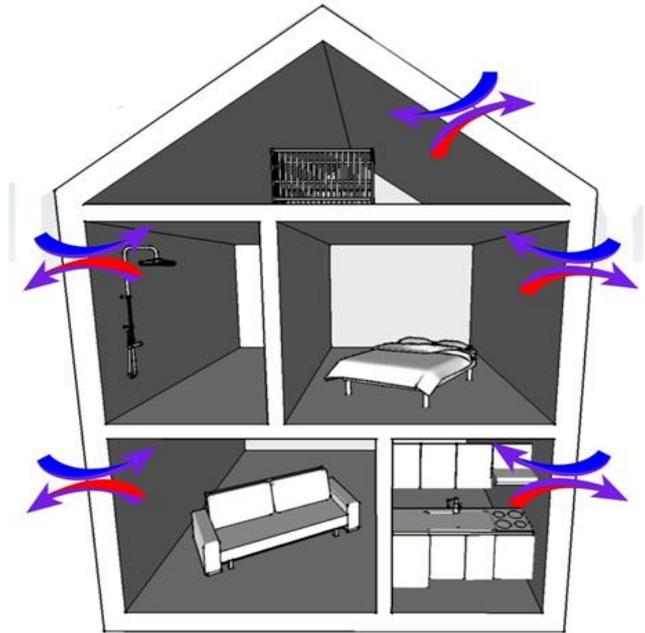


- Différents types de récupération de chaleur (contre-courant, courant croisé, aluminium, polystyrene,....)

# Exemples de réalisations pratiques

## Ventilation mécanique décentralisée avec récupération de chaleur

- Ventilation pièces par pièces (!attention au bruit généré => attention aux pertes de charge!)
- Ventilateurs
- Echangeur
- Capteurs (présence, humidité, CO2,...)
- Alimentation et convertisseur électrique
- Electronique de contrôle
- Filtres



- 2 types d'unités décentralisées:
  - mural
  - fenêtre

# Exemples de réalisations pratiques

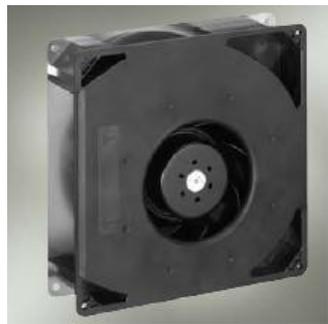
## Ventilation mécanique décentralisée avec récupération de chaleur

$$COP_{SRVHR} = \frac{\text{Recovered heat power}}{\text{Electrical supplied power}}$$

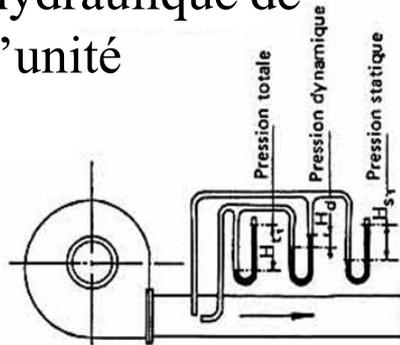


$$COP_{SRVHR} = \frac{M_{fresh} \cdot cp \cdot (t_{ind} - t_{out}) \cdot \epsilon}{W_{fans}}$$

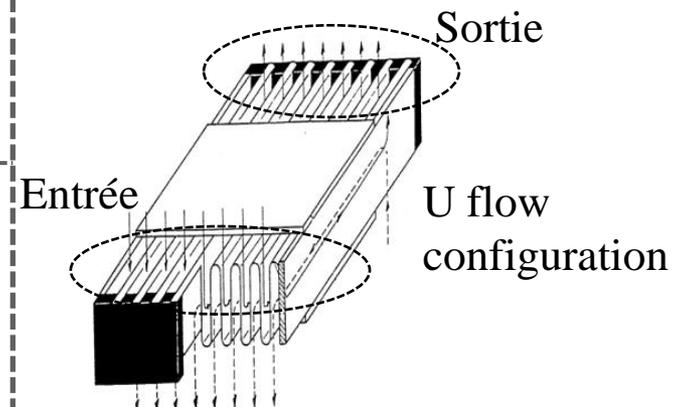
Climat



Ventilateur et performance hydraulique de l'unité



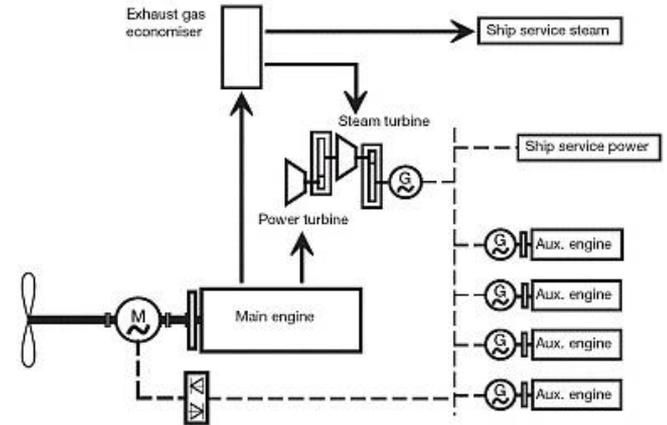
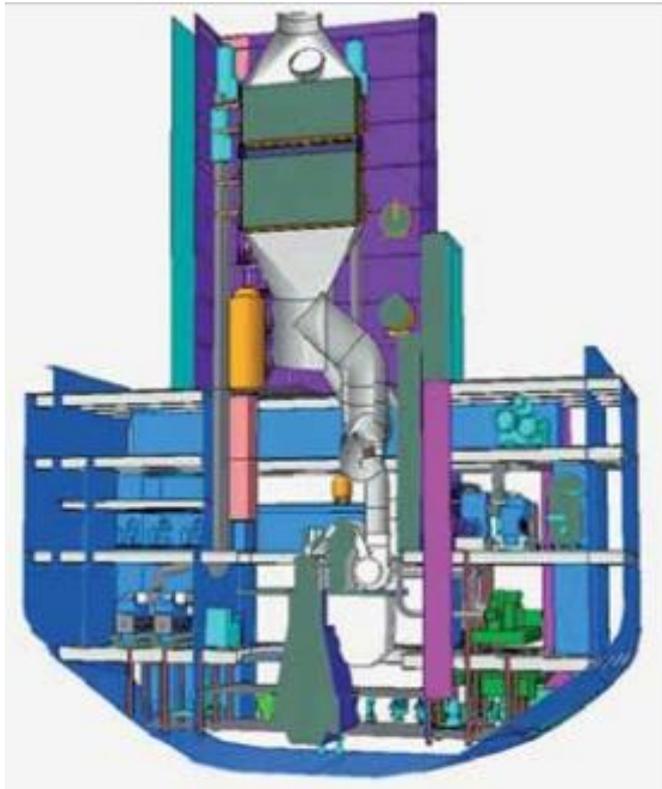
Echangeur de chaleur



# Exemples de réalisations pratiques

## *Economiseur sur gaz d'échappements de moteur de bateaux*

- Fonction: Récupération de chaleur sur gaz d'échappements pour génération de vapeur basse pression (8 bars).

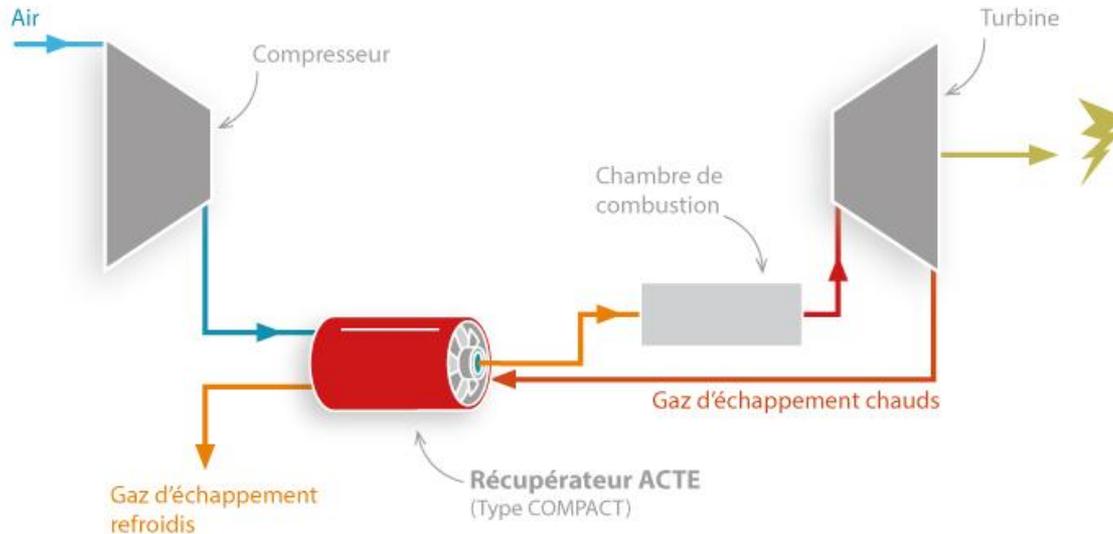


- Utilisation de la vapeur pour:
  - ✓ Chauffer l'huile et le fuel (souvent lourd sur bateau)
  - ✓ Pré-chauffage des équipements pendant lancement du moteur
  - ✓ Génération d'électricité via turbine
  - ✓ Entraînement des pompes pour remplissage des cuves
  - ✓ Nettoyage échangeur (suies), coques du bateau

# Exemples de réalisations pratiques

## *Récupérateur pour turbines à gaz*

- Fonction: Récupération de la chaleur sur gaz de combustion pour préchauffer l'air destiné en entrée de la chambre de combustion (cycle de Brayton). Augmentation du rendement de production de la turbine à gaz

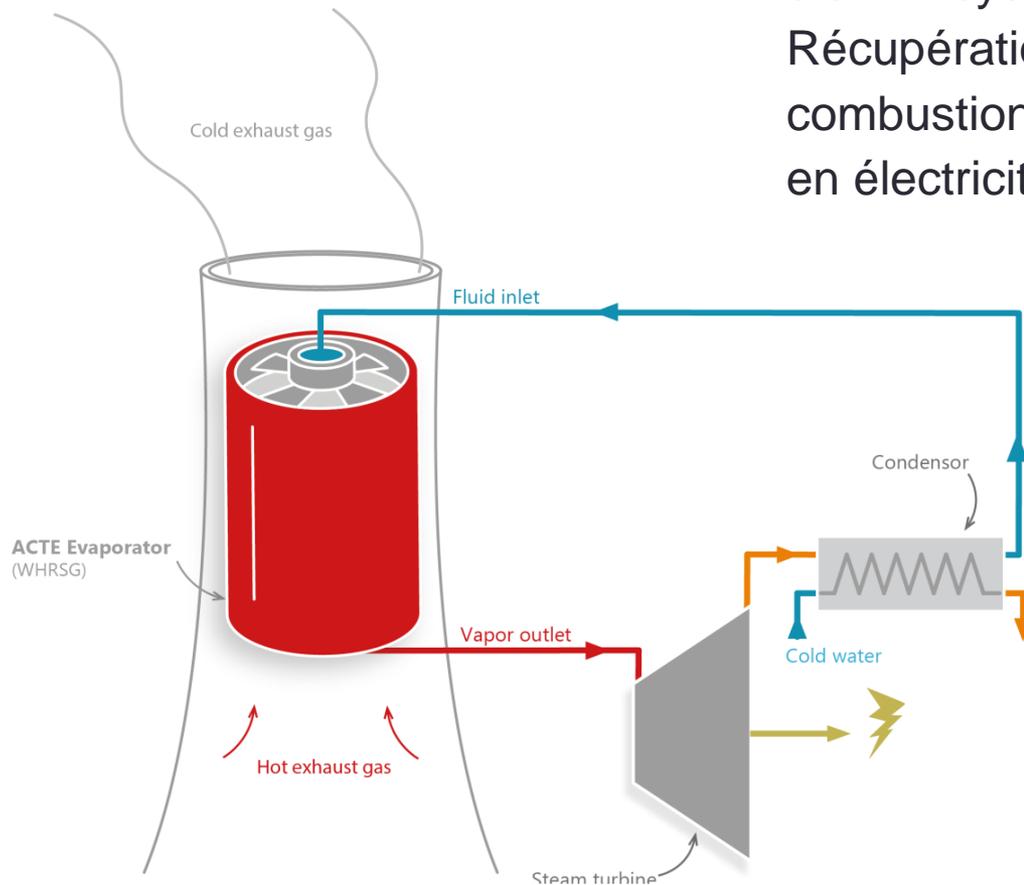


- Echangeur ultra compact
- Plaques en aluminium corrugué
- Efficacité thermique  $\pm 85\%$
- Collecteur
- Haute température

# Exemples de réalisations pratiques

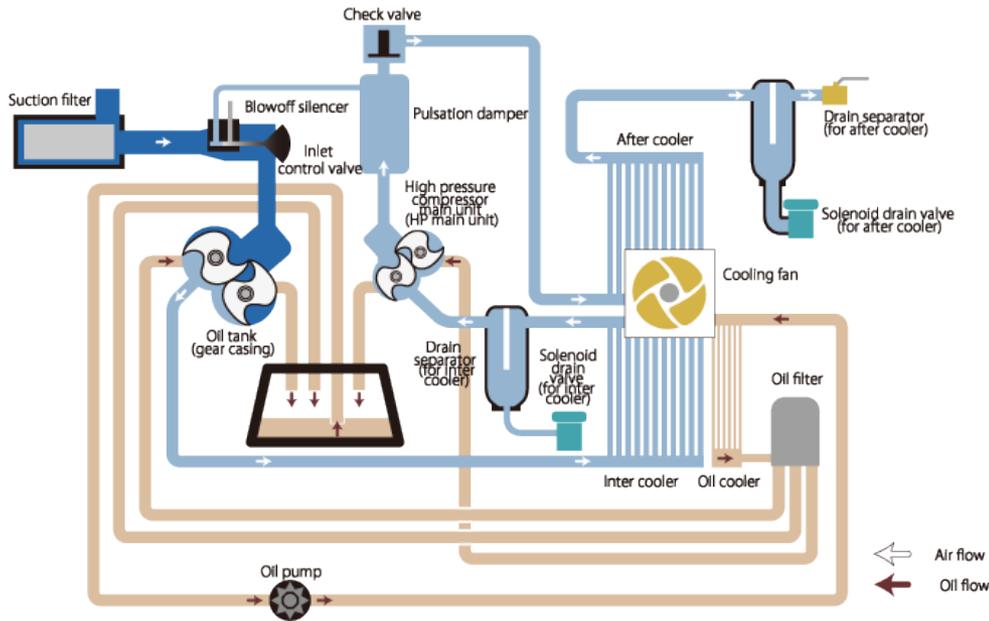
## *Cycle de Rankine Organique sur gaz de combustion*

- Fonction: Production d'électricité au moyen d'un cycle organique de Rankine. Récupération de la chaleur des gaz de combustion. Valorisation de la chaleur fatale en électricité.

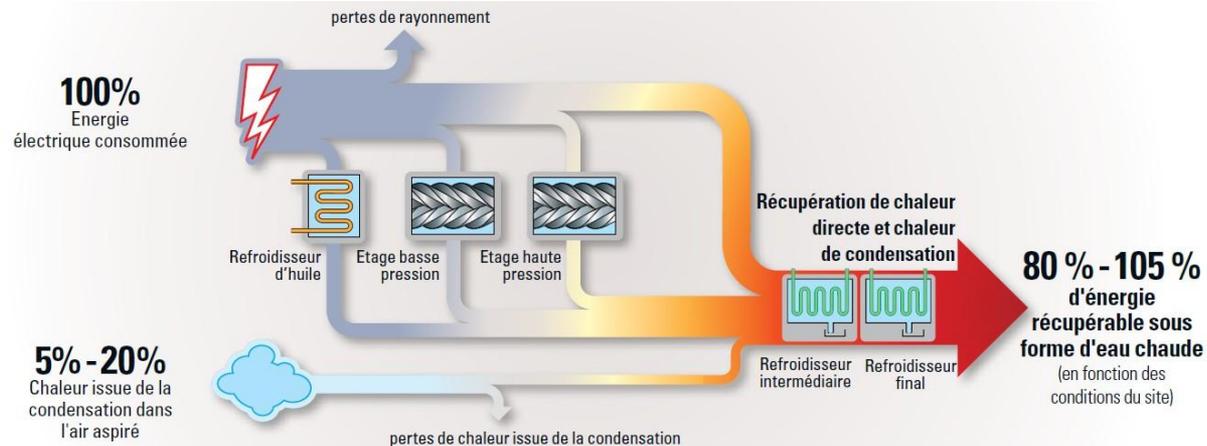


# Exemples de réalisations pratiques

## Récupération sur air comprimé



- Fonction: Production d'eau chaude en récupérant la chaleur dégagée lors de la compression



# Exemples de réalisations pratiques

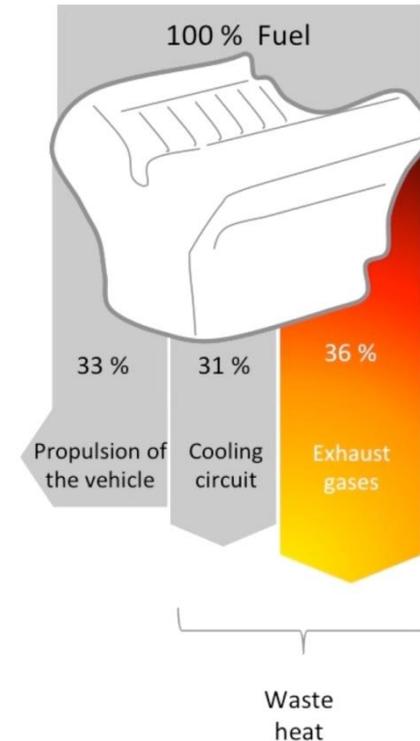
## Récupération sur gaz d'échappement des véhicules



✓ Utilisation de la vapeur pour générer soit de l'électricité soit de la puissance mécanique.

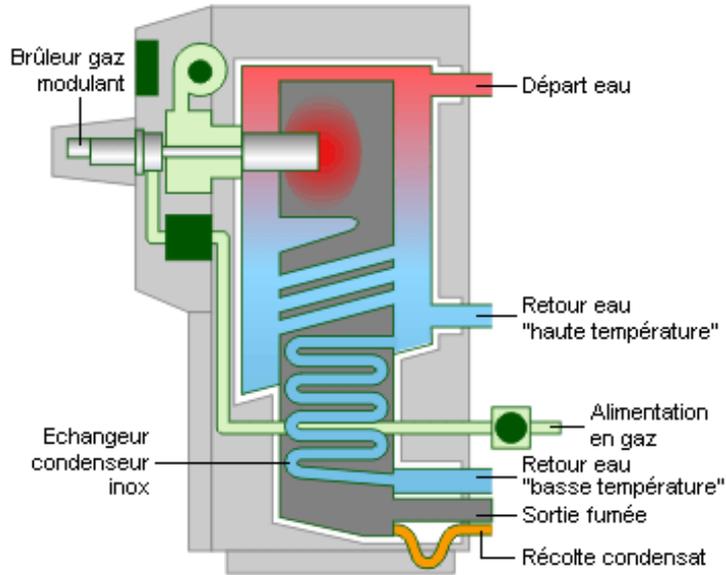
✓ Forte contrainte de poids et d'encombrement

- Fonction: Génération de vapeur d'eau en récupérant la chaleur des gaz d'échappement.

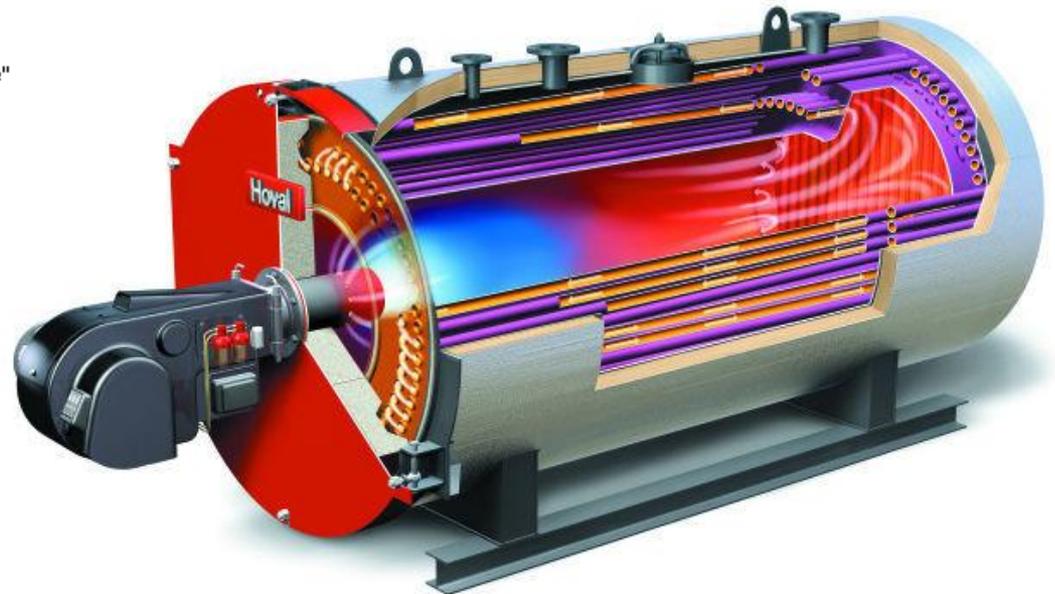


# Exemples de réalisations pratiques

## Chaudière

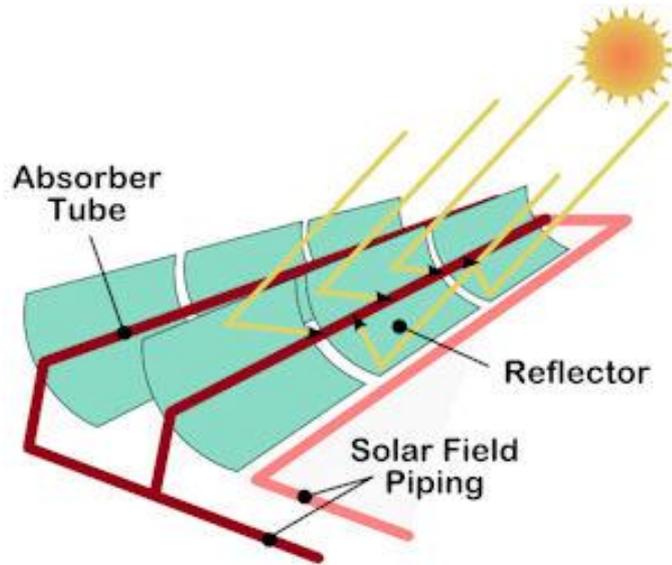


- Fonction: Transférer à de l'eau la chaleur produite par la combustion de gaz, mazout, bois, ...



# Exemples de réalisations pratiques

## *Concentrateur solaire*



- Fonction: Concentration des rayons du soleil sur un tube dans lequel circule un fluide qui s'échauffe.

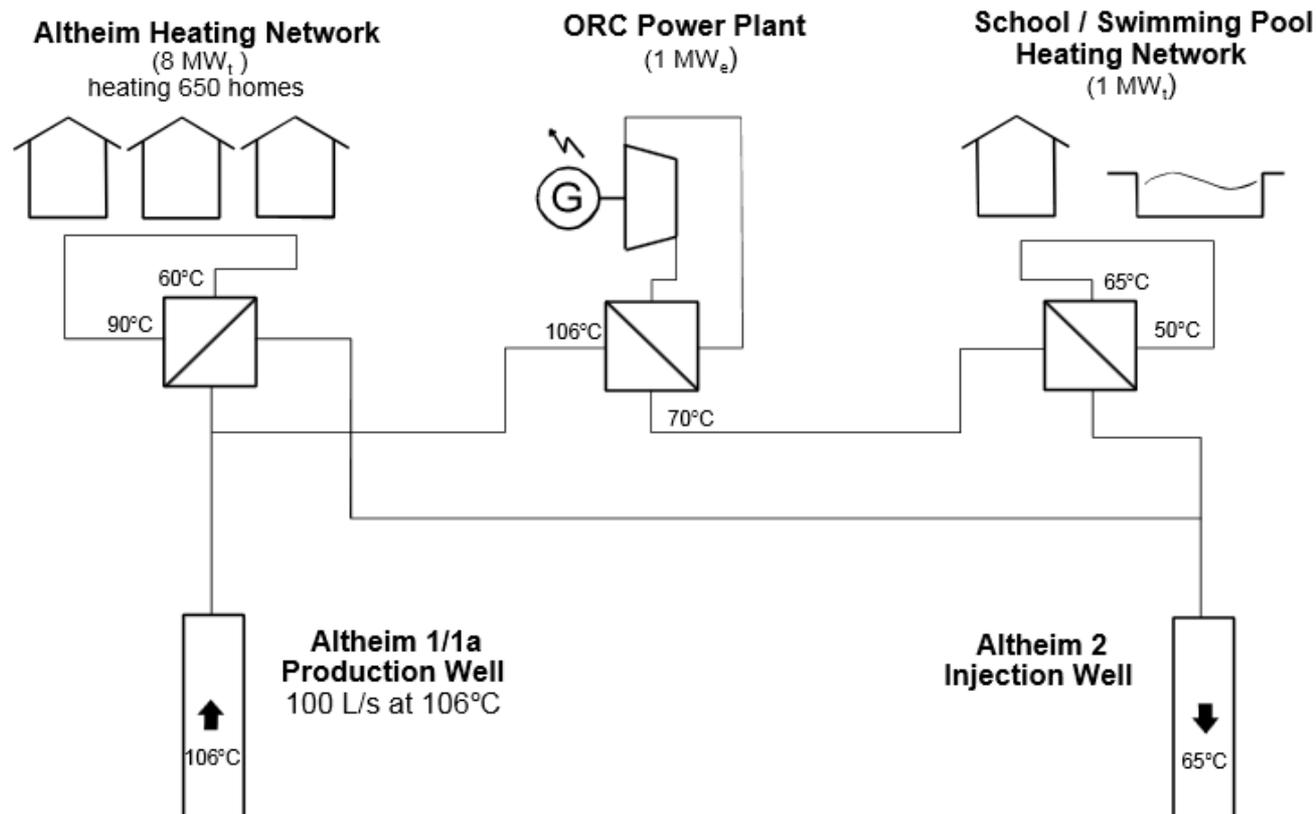
- ✓ Production de chaleur haute température
- ✓ Génération d'électricité dans des zones isolées.



# Exemples de réalisations pratiques

## *Exploitation de l'énergie géothermique*

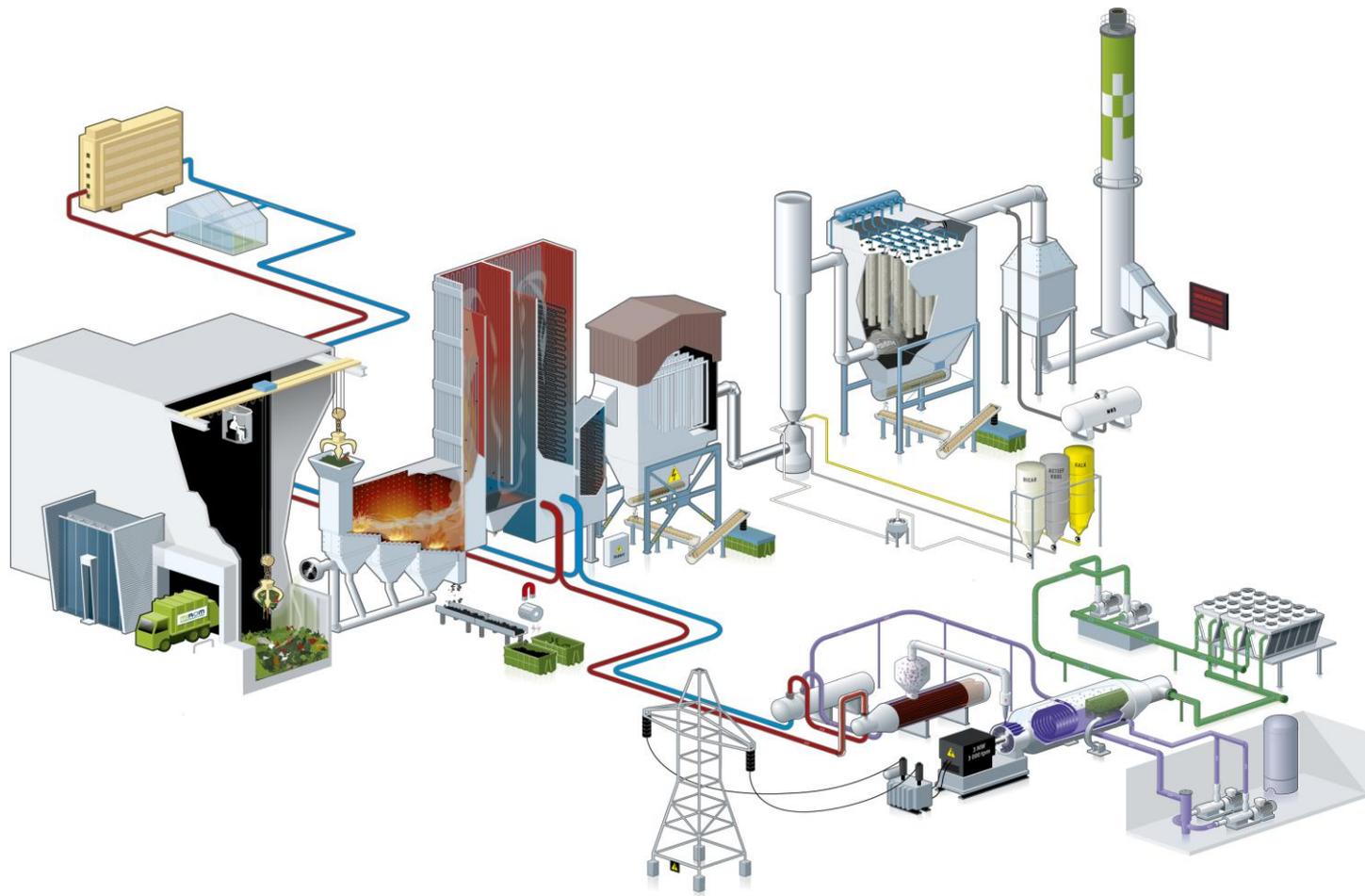
- Fonction: Utilisation de l'énergie géothermique pour le chauffage ou la production d'électricité.



# Exemples de réalisations pratiques

## *Incinération des déchets*

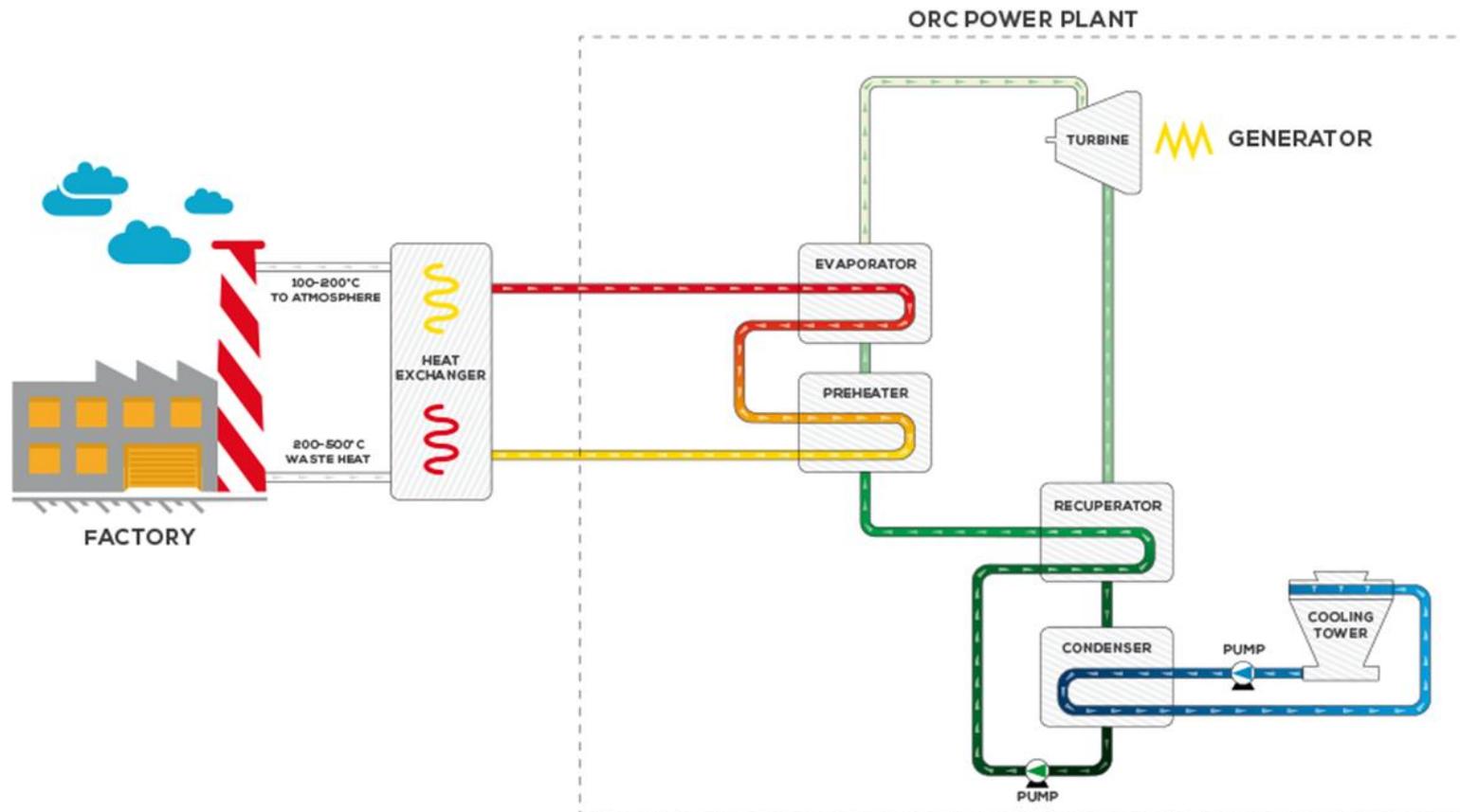
- Fonction: Echangeur de récupération de chaleur sur les gaz issus de la combustion des déchets.



# Exemples de réalisations pratiques

## *Incinération des déchets*

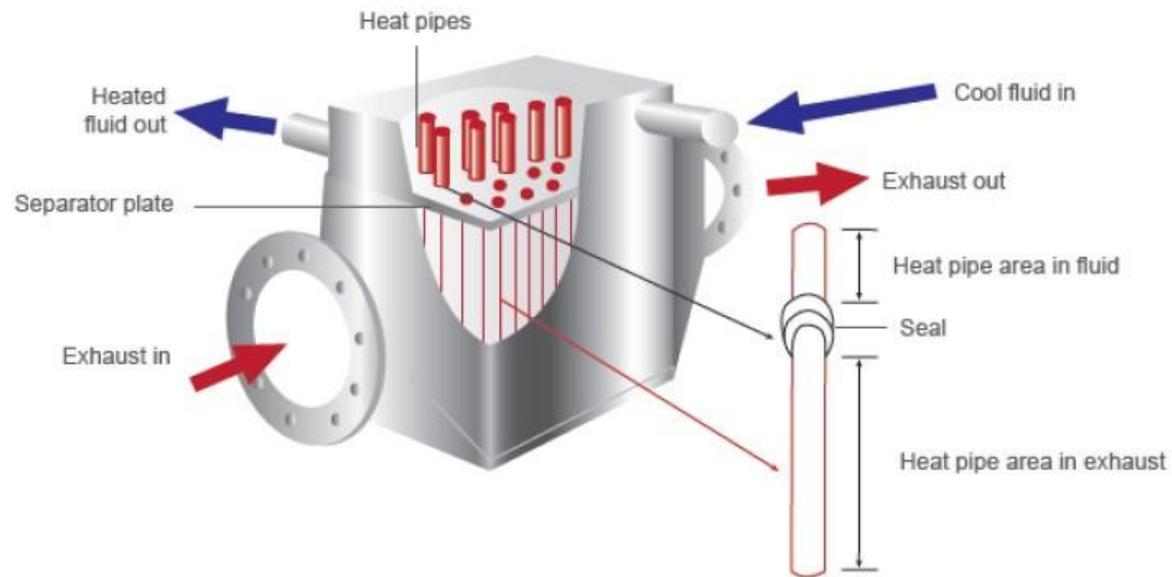
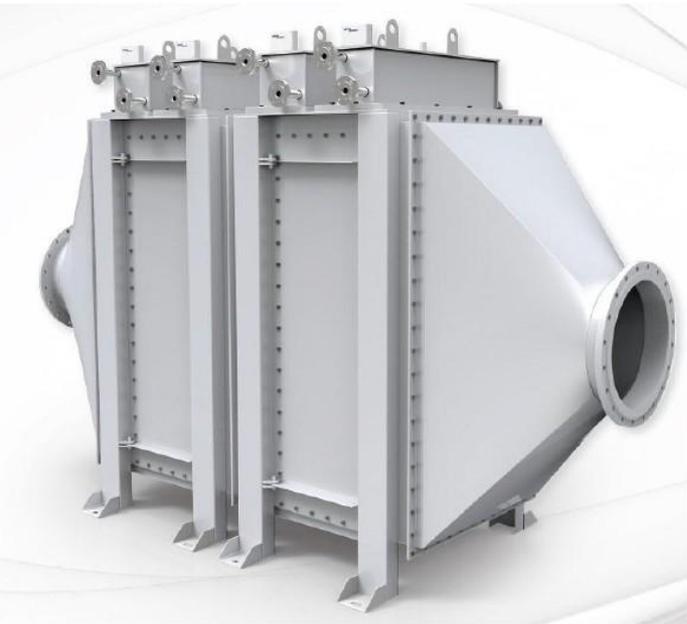
- Fonction: Echangeur de récupération de chaleur sur les gaz issus de la combustion des déchets.



# Exemples de réalisations pratiques

## *Récupération de chaleur par caloducs*

- Fonction: Echangeur de récupération sur fumée basé sur le principe du caloduc ou du thermosiphon diphasique



# Conclusions

---

- Les échangeurs de chaleur permettent de transférer de la chaleur d'un fluide vers un autre.
- Ce transfert s'effectue par rayonnement, convection et conduction.
- Tant leur géométrie que leur matériaux constitutifs sont adaptés à l'application à laquelle ils sont destinés.
- Leur performance s'évalue selon leur capacité à transmettre de grande quantité de chaleur sous une faible différence de température ... mais également à provoquer des pertes de charge aussi faible que possible pour limiter la consommation des auxiliaires
- Les échangeurs sont présents en grand nombre dans tous les secteurs d'activité