

# Machines thermiques

## I - Principe de fonctionnement

### I.A - Généralités

#### Définition (Machine thermique)

Une **machine thermique** est un dispositif dans lequel un système fluide échange du travail et des transferts thermiques avec l'extérieur au cours de transformations successives formant un **cycle**.

#### Propriété des variations des fonctions d'état sur un cycle

Dans le cadre du programme, on se limite aux machines dithermes, c'est-à-dire qui utilisent deux sources différentes pour les échanges thermiques. On parle généralement de source chaude et source froide. On représente généralement les échanges par un schéma :



**Pourquoi pas des machines monothermes ?**

### Inégalité de Clausius

#### Démonstration

### Deux types de structure pour les machines thermiques

- ▷ Machine à piston(s) :
  
  
  
  
  
  
  
  
  
  
- ▷ Machine à écoulement :

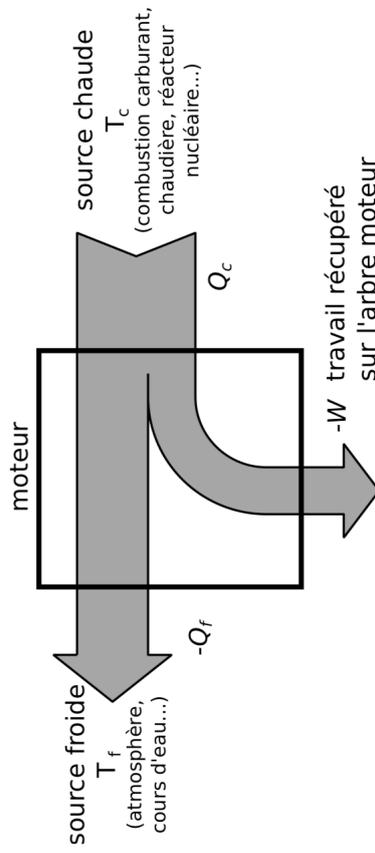
#### Remarque

En pratique, cela ne changera rien aux calculs de performance, car même dans le cas de la machine à écoulement, on prendra comme système TOUT le fluide dans la machine et on fera le bilan entre un instant initial et l'instant où tout le fluide a subi un cycle et se retrouve donc dans son état initial. Pour pouvoir faire ce raisonnement, il faut cependant que le régime soit permanent, ce qui sera toujours le cas dans le cadre du programme. En revanche, pour les machines à écoulement, on pourra demander d'étudier une étape en particulier, qui n'a donc pas lieu pour un système fermé, c'est l'objet de la suite du chapitre !

**Deux types de fonctions pour les machines thermiques**

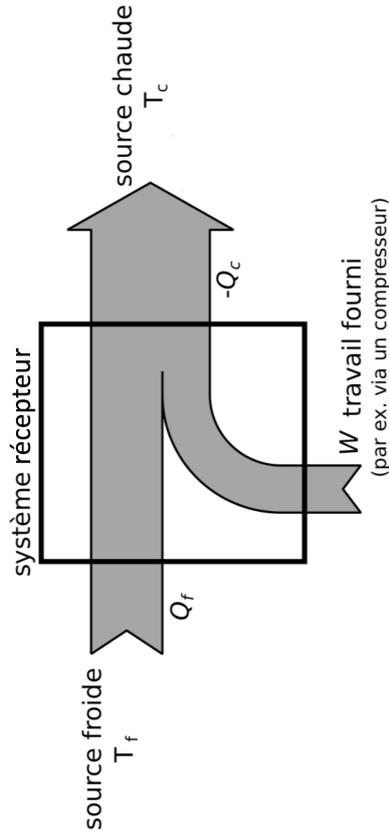
On classe les machines thermiques en fonction de leur objectif :

▷ **Les moteurs :**



**Rendement**

▷ **Les récepteurs :**



**Efficacité**

## Démonstration - Rendement maximal

*A savoir faire : démonstration des efficacités maximales*

## I.B - Cycle de Carnot

### Définition (Cycle de Carnot)

Le cycle de Carnot est le cycle qui permet d'atteindre la performance (rendement ou efficacité) maximale.

C'est un cycle réversible composé de :

- ▷ deux isothermes réversibles aux températures des sources
- ▷ deux adiabatiques réversibles

### Remarque

Le cycle de Carnot étant réversible, il peut être parcouru dans les deux sens : il s'agit donc du même cycle pour le moteur de Carnot et pour le récepteur de Carnot.

En pratique, on n'essaie pas de réaliser ce cycle, car pour qu'il soit réversible, il doit se faire de façon quasi-statique, donc infiniment lente.

Ainsi, même si on maximise l'énergie récupérée (en maximisant le rendement), la puissance récupérée sera nulle !

## II - Principes industriels de la thermodynamique

### II.A - Premier principe industriel

#### Premier principe industriel

Pour un fluide en écoulement **stationnaire** dans une conduite, entre l'entrée et la sortie d'un volume de contrôle, on a :

avec  $h$  l'enthalpie massique,  $v$  la vitesse débitante du fluide,  $z$  l'altitude moyenne dans la conduite,  $w'$  le travail massique (=travail reçu par unité de masse traversante) hors forces pressantes,  $q$  le transfert thermique massique (=transfert thermique reçu par unité de masse traversante),  $D_m$  le débit massique,  $\mathcal{P}_m$  la puissance mécanique reçue par le fluide dans le volume de contrôle,  $\mathcal{P}_{th}$  la puissance thermique reçue par le fluide dans le volume de contrôle.

#### Remarque

#### Démonstration



Volume de contrôle à plusieurs entrées et/ou sorties

## II.B - Second principe industriel

Second principe industriel

### Démonstration

## III - Etude de quelques dispositifs élémentaires

Hypothèses :

- ▷ les éléments sont calorifugés (sauf pour l'échangeur simple flux)
- ▷ on néglige les variations d'énergie cinétique (sauf pour la tuyère) et potentielles
- ▷ l'écoulement est toujours considéré stationnaire

### III.A - Compresseur, pompe et turbine

#### Définition (Compresseur ou pompe)

Un compresseur est un dispositif permettant d'augmenter la pression d'un gaz par un procédé mécanique.

Une pompe a la même fonction pour un liquide.

Représentation

#### Définition (Turbine)

Une turbine est un dispositif tournant permettant d'extraire un travail mécanique du fluide via des parties mobiles, tout en diminuant la pression du fluide.

Représentation

#### Application du 1<sup>er</sup> principe

#### Définition (Rendement isentropique)

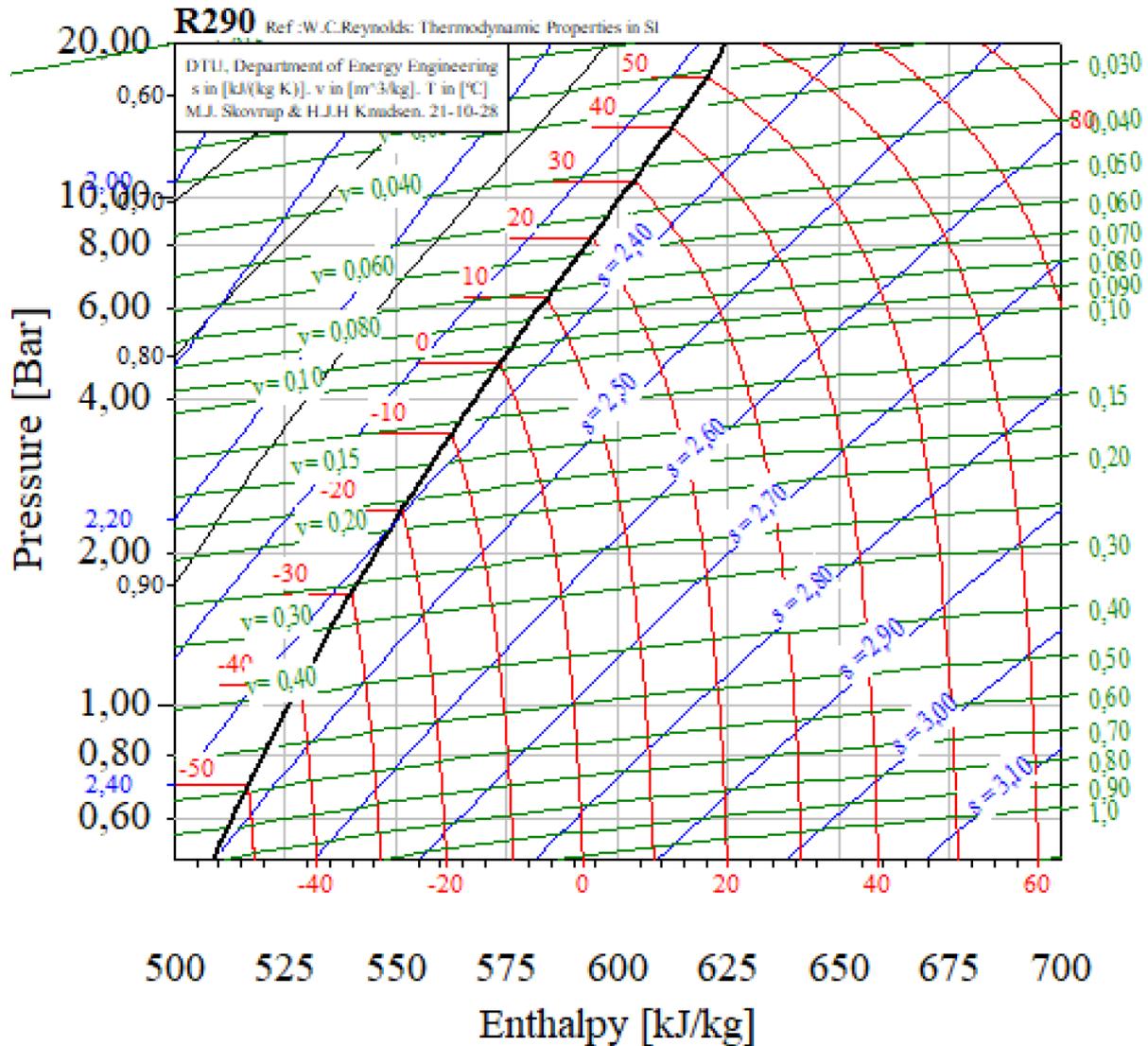
L'irréversibilité d'un compresseur/pompe ou d'une turbine affecte ses performances. On appelle rendement isentropique le nombre (inférieur à 1) qui compare la transformation réelle à une transformation comparable mais isentropique :

$$\eta_{turb} = \frac{w_i^{reel}}{w_i^{isos}} = \frac{(h_s - h_e)^{reel}}{(h_s - h_e)^{isos}}$$

$$\eta_{comp} = \frac{w_i^{isos}}{w_i^{reel}} = \frac{(h_s - h_e)^{isos}}{(h_s - h_e)^{reel}}$$



Application



Zoom sur la courbe de rosée du propane dans le diagramme des frigoristes.

On considère une compression de  $\Delta P = 9$  bar du propane R290 en partant d'un état initial à  $h_1 = 573 \text{ kJ.mol}^{-1}$  et  $P_1 = 1$  bar.

On veut comparer deux cas de figure : la compression réversible et la compression irréversible (telle que  $s_{créée} = 0,1 \text{ kJ.K}^{-1}.\text{kg}^{-1}$ ).

1. Représenter les 2 compressions sur le diagramme.
2. Déterminer le rendement isentropique.
3. Déterminer  $T_2$  et  $T'_2$  les températures atteintes respectivement dans le cas réversible et irréversible.

## III.B - Détendeur

### Définition (Détendeur)

Un détendeur est un dispositif permettant de diminuer la pression d'un fluide sans échanger de travail mécanique mais par l'intermédiaires d'un obstacle ou d'une variation brutale de section (entraînant une perte de charge).

Représentation

### Application du 1<sup>er</sup> principe

**Remarque**

## III.C - Tuyère

### Définition (Tuyère)

Une tuyère est un dispositif permettant d'accélérer le fluide.

Application du 1<sup>er</sup> principe



**Application**

On considère un gaz parfait passant dans une tuyère de façon réversible. En entrée, le gaz a une température  $T_e$  et une pression  $P_e$ , en sortie il est à la pression  $P_s$ . Déterminer  $v_s$  la vitesse du gaz en sortie en négligeant la vitesse d'entrée.

### III.D - Echangeur thermique

Définition (Echangeur thermique)

Un échangeur thermique est un dispositif permettant un transfert thermique entre deux fluides sans qu'ils ne se mélangent.

Représentation

**Remarque**

Application du 1<sup>er</sup> principe à l'échangeur double flux

Application du 1<sup>er</sup> principe à l'échangeur simple flux

### III.E - Mélangeur et séparateur

**Définition (Mélangeur)**

Un mélangeur est un dispositif permettant de mélanger deux fluides en écoulement, souvent à la même pression.

Application du 1<sup>er</sup> principe

**Définition (Séparateur)**

Un séparateur est un dispositif permettant de séparer un mélange diphasé (en général liquide/vapeur)

**Application du 1<sup>er</sup> principe**

**III.F - Récapitulatif**

Dispositif	Rôle	$w_i$	$q$	Premier principe
Compresseur Pompe	Augmenter la pression du fluide $\Delta P > 0$	$> 0$	0	$h_s - h_e = w_i > 0$
Turbine	Récupérer un travail mécanique et diminuer la pression du fluide $\Delta P < 0$	$< 0$	0	$h_s - h_e = w_i < 0$
Détendeur	Diminuer la pression du fluide $\Delta P < 0$	0	0	$h_s - h_e = 0$
Tuyère	Augmenter la vitesse du fluide $\Delta e_c > 0$	0	0	$h_s + \frac{1}{2}v_s^2 = h_e + \frac{1}{2}v_e^2$
Echangeur thermique simple flux Evaporateur, condenseur	Permettre un échange thermique avec l'extérieur	0	$\neq 0$	$h_s - h_e = q$
Echangeur thermique double flux	Permettre un échange thermique entre 2 fluides sans mélange	0	0	$D_{m1}\Delta h_1 + D_{m2}\Delta h_2 = 0$
Mélangeur	Mélanger deux fluides	0	0	$D_{ms}h_s - (D_{me1}h_{e1} + D_{me2}h_{e2}) = 0$
Séparateur	Séparer deux phases	0	0	$(D_{ms1}h_{s1} + D_{ms2}h_{s2}) - D_{me}h_e = 0$

## IV - Exemple et amélioration d'un cycle : cycle de Rankine

Le cycle Rankine est un cycle moteur : c'est celui du moteur à vapeur, qu'on retrouve dans de nombreuses centrales électriques (qu'elles soient thermiques fossiles ou nucléaires).

### IV.A - Structure d'une installation motrice à vapeur

*cf schéma d'une installation nucléaire*

Schématisation du cycle

### IV.B - Modélisation : cycle de Rankine simple

Reprenons chaque étape et donnons la modélisation idéalisée qui en est faite dans le cadre du cycle de Rankine :

- ▷ pompe :
- ▷ évaporateur :
- ▷ turbine :
- ▷ condenseur :

*cf représentation sur le diagramme des frigoristes pour les valeurs usuelles dans les centrales nucléaires*

Les températures sont exprimées en °C

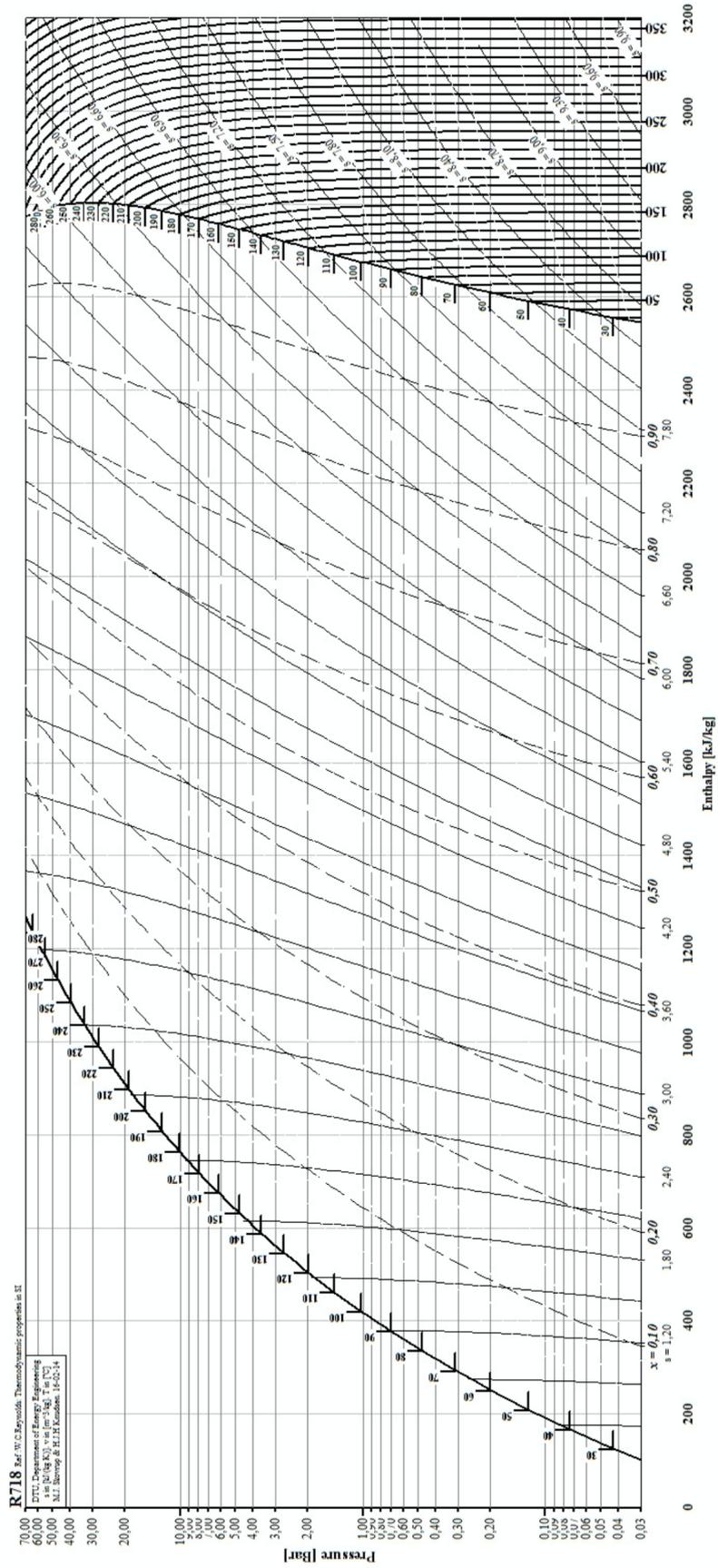


Diagramme des frigorigènes de l'eau



### **Application - Calcul du rendement**

Pour les valeurs usuelles du cycle idéalisé dans une centrale nucléaire, déterminer le rendement du cycle moteur.

## **IV.C - Optimisation du cycle**

### **IV.C.1 - Comparaison au cycle de Carnot**

*cf tracé du cycle de Carnot sur le diagramme des frigoristes*

### **IV.C.2 - Amélioration du cycle**