

Leçon 18 : thermodynamique industrielle

E. Capitaine

TSI 2 - Lycée Charles Coëffin

4 mars 2026

Plan

- 1 Introduction
- 2 Approche globale
 - Sens des échanges d'énergie dans une machine ditherme
 - Performance
- 3 Principes de la thermodynamiques pour un fluide en écoulement
 - Du système ouvert à un système fermé
 - Bilan d'énergie : premier principe pour le système ouvert
 - Bilan d'entropie : deuxième principe pour le système ouvert
- 4 Quelques composants des installations industrielles
 - Détendeur
 - Compresseur, pompe et turbine
 - Échangeur thermique
- 5 Application à la pompe à chaleur air-eau
 - Structure
 - Étude du cycle sur le diagramme des frigoristes
 - Coefficient de performance

Plan

- 1 Introduction
- 2 Approche globale
 - Sens des échanges d'énergie dans une machine ditherme
 - Performance
- 3 Principes de la thermodynamiques pour un fluide en écoulement
 - Du système ouvert à un système fermé
 - Bilan d'énergie : premier principe pour le système ouvert
 - Bilan d'entropie : deuxième principe pour le système ouvert
- 4 Quelques composants des installations industrielles
 - Détendeur
 - Compresseur, pompe et turbine
 - Échangeur thermique
- 5 Application à la pompe à chaleur air-eau
 - Structure
 - Étude du cycle sur le diagramme des frigoristes
 - Coefficient de performance

Introduction

Nous allons étudier dans cette leçon deux types de machines thermiques :

- les **machines à piston** comme les moteurs à combustion de voiture

Introduction

Nous allons étudier dans cette leçon deux types de machines thermiques :

- les **machines à piston** comme les moteurs à combustion de voiture
- et les **machines à écoulement** comme les congélateurs ou les réacteurs d'avion.

Introduction

Les **machines à piston** sont caractérisé par une chambre cylindrique dans laquelle toutes les transformations ont lieu et dont le volume varie grâce à un piston mobile. ❤️

Il peut y avoir plusieurs chambres montées en parallèle, comme c'est le cas du moteur quatre cylindre.

Les machines à pistons usuelles sont toutes des moteurs généralement de petites dimensions, ce qui permet de les utiliser dans des installations mobiles.

Introduction

Les **machines à écoulement** sont caractérisés par un fluide qui y circule et traverse successivement différents composants dans lesquels il subit des transformations. Le fluide utilisé est qualifié selon les situations de fluide **caloporteur** ou de **fluide frigorigène**. ❤️

Une machine à écoulement de fluide peut aussi bien être un moteur qu'une machine frigorifique.

Introduction

Dans la première section du cours nous reviendrons sur les différentes notions vues en TSI 1 portant sur les **cycles de machines à pistons** .

Pour étudier les **machines à écoulements** de manière adéquates, nous devrons, dans la deuxième partie de ce cours, reformuler les principes de la thermodynamique pour un fluide en écoulement.

Plan

- 1 Introduction
- 2 Approche globale
 - Sens des échanges d'énergie dans une machine ditherme
 - Performance
- 3 Principes de la thermodynamiques pour un fluide en écoulement
 - Du système ouvert à un système fermé
 - Bilan d'énergie : premier principe pour le système ouvert
 - Bilan d'entropie : deuxième principe pour le système ouvert
- 4 Quelques composants des installations industrielles
 - Détendeur
 - Compresseur, pompe et turbine
 - Échangeur thermique
- 5 Application à la pompe à chaleur air-eau
 - Structure
 - Étude du cycle sur le diagramme des frigoristes
 - Coefficient de performance

Approche globale

Sens des échanges d'énergie dans une machine ditherme

Rappels :

Approche globale

Sens des échanges d'énergie dans une machine ditherme

Rappels :

- Une machine est dite **ditherme** si elle n'échange de transfert thermique qu'avec deux sources de chaleur au cours du cycle : les **sources chaude et froide** desquelles la machine reçoit respectivement les **transferts thermiques algébriques** Q_c et Q_f .

Approche globale

Sens des échanges d'énergie dans une machine ditherme

Rappels :

- Une machine est dite **ditherme** si elle n'échange de transfert thermique qu'avec deux sources de chaleur au cours du cycle : les **sources chaude et froide** desquelles la machine reçoit respectivement les **transferts thermiques algébriques** Q_c et Q_f .
- Si le fluide de la machine reçoit de la chaleur de la source chaude $Q_c > 0$ et fournit de la chaleur à la source froide $Q_f < 0$ alors le transfert thermique se fait dans le **sens naturel**. Le fluide peut donner du **travail mécanique provenant des parties mobiles de la machine** $W < 0$: la machine est un **moteur**.

Approche globale

Sens des échanges d'énergie dans une machine ditherme

Rappels :

- Une machine est dite **ditherme** si elle n'échange de transfert thermique qu'avec deux sources de chaleur au cours du cycle : les **sources chaude et froide** desquelles la machine reçoit respectivement les **transferts thermiques algébriques** Q_c et Q_f .
- Si le fluide de la machine reçoit de la chaleur de la source chaude $Q_c > 0$ et fournit de la chaleur à la source froide $Q_f < 0$ alors le transfert thermique se fait dans le **sens naturel**. Le fluide peut donner du **travail mécanique provenant des parties mobiles de la machine** $W < 0$: la machine est un **moteur**.
- Si le fluide reçoit de la chaleur de la source froide $Q_f > 0$ et fournit de la chaleur à la source chaude $Q_c < 0$ alors le transfert thermique se fait dans un **sens non naturel**. Le fluide doit fournir du travail mécanique aux parties mobiles de la machine afin de "payer" ce transfert non naturel $W > 0$: la machine est une **machine frigorifique**.

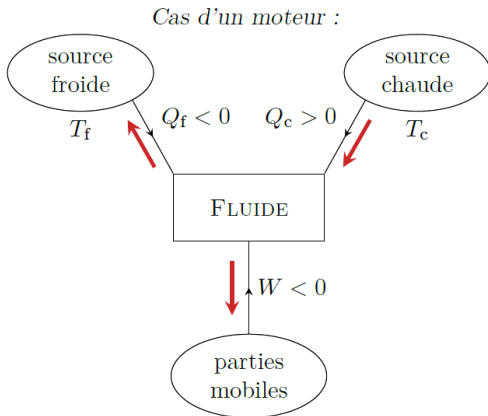
Approche globale

Sens des échanges d'énergie dans une machine ditherme

Schéma d'un moteur :

Le transfert thermique se fait dans le sens naturel, le fluide reçoit de la chaleur de la source chaude $Q_c > 0$ et donne de la chaleur à la source froide $Q_f < 0$.

Le fluide exploite le sens naturel pour donner du travail mécanique aux parties mobiles de la machine $W < 0$.



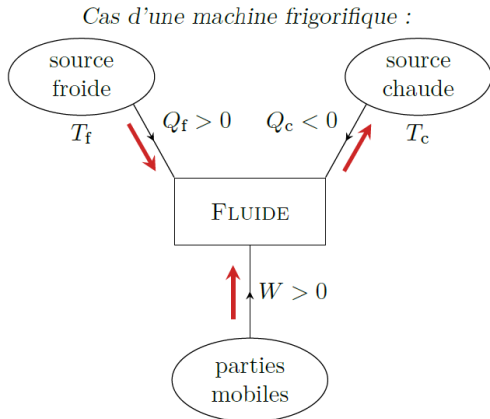
Approche globale

Sens des échanges d'énergie dans une machine ditherme

Schéma d'une machine frigorifique :

Le transfert thermique se fait dans le sens non naturel, le fluide reçoit de la chaleur de la source froide $Q_f > 0$ et donne de la chaleur à la source chaude $Q_c < 0$.

Le fluide paye le sens non naturel et reçoit du travail mécanique des parties mobiles de la machine $W > 0$.



Approche globale

Performance

Rappel :

De façon très générale, la performance d'une machine thermique est décrite par un nombre sans dimension :

$$\text{performance} = \left| \frac{\text{énergie intéressante à récupérer}}{\text{énergie coûteuse dépensée}} \right| . \quad \color{red}{\heartsuit}$$

La performance caractérise le cycle de fonctionnement de la machine et s'exprime en fonction des **énergies ou des puissances** repérées sur les étapes du cycles.

Les deux énergies ou puissances qui interviennent dans le calcul de performance sont celles liées au **travail W** et au **transfert thermique autre que le transfert thermique avec l'extérieur.** ♥

Approche globale

Performance

Rappel : la performance d'un moteur

Approche globale

Performance

Rappel : la performance d'un moteur

Elle correspond à son **rendement** noté η . 

- L'énergie intéressante à récupérer est :

Approche globale

Performance

Rappel : la performance d'un moteur

Elle correspond à son **rendement** noté η . ❤️

- L'énergie intéressante à récupérer est : le travail fourni aux pièces mobiles $W < 0$.

Approche globale

Performance

Rappel : la performance d'un moteur

Elle correspond à son **rendement** noté η . ❤️

- L'énergie intéressante à récupérer est : le travail fourni aux pièces mobiles $W < 0$.
- L'énergie coûteuse à dépenser est :

Approche globale

Performance

Rappel : la performance d'un moteur

Elle correspond à son **rendement** noté η . 

- L'énergie intéressante à récupérer est : le travail fourni aux pièces mobiles $W < 0$.
- L'énergie coûteuse à dépenser est : la chaleur obtenue avec la source chaude intérieure $Q_c > 0$.

Approche globale

Performance

Rappel : la performance d'un moteur

Elle correspond à son **rendement** noté η . 

- L'énergie intéressante à récupérer est : le travail fourni aux pièces mobiles $W < 0$.
- L'énergie coûteuse à dépenser est : la chaleur obtenue avec la source chaude intérieure $Q_c > 0$.
- Le rendement est donc

Approche globale

Performance

Rappel : la performance d'un moteur

Elle correspond à son **rendement** noté η . 

- L'énergie intéressante à récupérer est : le travail fourni aux pièces mobiles $W < 0$.
- L'énergie coûteuse à dépenser est : la chaleur obtenue avec la source chaude intérieure $Q_c > 0$.
- Le rendement est donc

$$\eta = -\frac{W}{Q_c} = -\frac{\mathcal{P}_m}{\mathcal{P}_c}$$

avec $\mathcal{P}_m$ et $\mathcal{P}_c$ les puissances mécanique et thermique de la source chaude.

Approche globale

Performance

Rappel : la performance d'un moteur

À partir du premier et du second principe appliqué à un cycle, on peut exprimer autrement le rendement d'un moteur

Approche globale

Performance

Rappel : la performance d'un moteur

À partir du premier et du second principe appliqué à un cycle, on peut exprimer autrement le rendement d'un moteur

$$\Delta U = U_f - U_i = U_i - U_i = 0 \quad \text{car cycle}$$

$$\Delta U = Q_c + Q_f + W \quad \text{1er principe}$$

Approche globale

Performance

Rappel : la performance d'un moteur

À partir du premier et du second principe appliqué à un cycle, on peut exprimer autrement le rendement d'un moteur

$$\Delta U = U_f - U_i = U_i - U_i = 0 \quad \text{car cycle}$$

$$\Delta U = Q_c + Q_f + W \quad \text{1er principe}$$

$$\text{donc} \quad Q_c + Q_f + W = 0 \quad \Longleftrightarrow \quad W = -Q_c - Q_f$$

$$\eta = -\frac{W}{Q_c} = \frac{Q_c + Q_f}{Q_c}$$

$$\eta = 1 + \frac{Q_f}{Q_c}.$$

Approche globale

Performance

Rappel : la performance d'un moteur

À partir du premier et du second principe appliqué à un cycle, on peut exprimer autrement le rendement d'un moteur

$$\Delta S = S_f - S_i = S_i - S_i = 0 \quad \text{car cycle}$$

$$\Delta S = S_{rc} + S_{rf} + S_c \quad \text{2ème principe}$$

Approche globale

Performance

Rappel : la performance d'un moteur

À partir du premier et du second principe appliqué à un cycle, on peut exprimer autrement le rendement d'un moteur

$$\Delta S = S_f - S_i = S_i - S_i = 0 \quad \text{car cycle}$$

$$\Delta S = S_{rc} + S_{rf} + S_c \quad \text{2ème principe}$$

$$\text{donc} \quad S_{rc} + S_{rf} + S_c = 0 \quad \Longleftrightarrow \quad \frac{Q_c}{T_c} + \frac{Q_f}{T_f} + S_c = 0$$

$$Q_f = -Q_c \frac{T_f}{T_c} - T_f S_c$$

$$\eta = 1 + \frac{Q_f}{Q_c} = 1 - \frac{T_f}{T_c} - \frac{T_f S_c}{Q_c}.$$

Approche globale

Performance

Rappel : la performance d'un moteur

À partir du premier et du second principe appliqué à un cycle, on peut exprimer autrement le rendement d'un moteur. Dans le cas d'un cycle réversible $S_c = 0$, le rendement atteint sa valeur maximale appelée

rendement de Carnot ❤️

$$\eta_C = 1 - \frac{T_f}{T_c}. \quad \text{❤️}$$

On constate que le rendement d'un moteur est compris entre 0 ($T_f = T_c$) et 1 ($T_f \ll T_c$).

Approche globale

Performance

Rappel : la performance d'un moteur

À partir du premier et du second principe appliqué à un cycle, on peut exprimer autrement le rendement d'un moteur. Dans le cas d'un cycle réversible $S_c = 0$, le rendement atteint sa valeur maximale appelée

rendement de Carnot ❤️

$$\eta_C = 1 - \frac{T_f}{T_c}. \quad \text{❤️}$$

On constate que le rendement d'un moteur est compris entre 0 ($T_f = T_c$) et 1 ($T_f \ll T_c$).

Approche globale

Performance

Rappel : la performance d'une machine frigorifique

Cas de la pompe à chaleur

Approche globale

Performance

Rappel : la performance d'une machine frigorifique

Cas de la pompe à chaleur

Elle correspond à son efficacité notée e ou son coefficient de performance frigorifique noté COP. ❤️

- L'énergie intéressante à récupérer est :

Approche globale

Performance

Rappel : la performance d'une machine frigorifique

Cas de la pompe à chaleur

Elle correspond à son efficacité notée e ou son coefficient de performance frigorifique noté COP. ❤️

- L'énergie intéressante à récupérer est : la chaleur fournie à la source chaude (l'intérieur) $Q_c < 0$.

Approche globale

Performance

Rappel : la performance d'une machine frigorifique

Cas de la pompe à chaleur

Elle correspond à son efficacité notée e ou son coefficient de performance frigorifique noté COP. ❤️

- L'énergie intéressante à récupérer est : la chaleur fournie à la source chaude (l'intérieur) $Q_c < 0$.
- L'énergie coûteuse à dépenser est :

Approche globale

Performance

Rappel : la performance d'une machine frigorifique

Cas de la pompe à chaleur

Elle correspond à son efficacité notée e ou son coefficient de performance frigorifique noté COP. ❤️

- L'énergie intéressante à récupérer est : la chaleur fournie à la source chaude (l'intérieur) $Q_c < 0$.
- L'énergie coûteuse à dépenser est : le travail des parties mobiles récupéré $W > 0$.

Approche globale

Performance

Rappel : la performance d'une machine frigorifique

Cas de la pompe à chaleur

Elle correspond à son efficacité notée e ou son coefficient de performance frigorifique noté COP. ❤️

- L'énergie intéressante à récupérer est : la chaleur fournie à la source chaude (l'intérieur) $Q_c < 0$.
- L'énergie coûteuse à dépenser est : le travail des parties mobiles récupéré $W > 0$.
- L'efficacité est donc

Approche globale

Performance

Rappel : la performance d'une machine frigorifique

Cas de la pompe à chaleur

Elle correspond à son efficacité notée e ou son coefficient de performance frigorifique noté COP. ❤️

- L'énergie intéressante à récupérer est : la chaleur fournie à la source chaude (l'intérieur) $Q_c < 0$.
- L'énergie coûteuse à dépenser est : le travail des parties mobiles récupéré $W > 0$.
- L'efficacité est donc

$$e = -\frac{Q_c}{W} = -\frac{\mathcal{P}_c}{\mathcal{P}_m}$$

avec $\mathcal{P}_m$ et $\mathcal{P}_c$ les puissances mécanique et thermique de la source chaude.

Approche globale

Performance

Rappel : la performance d'une machine frigorifique

Cas de la pompe à chaleur

À partir du premier et du second principe appliqué à un cycle, on peut exprimer autrement l'efficacité de la pompe à chaleur

Approche globale

Performance

Rappel : la performance d'une machine frigorifique

Cas de la pompe à chaleur

À partir du premier et du second principe appliqué à un cycle, on peut exprimer autrement l'efficacité de la pompe à chaleur

$$\Delta U = U_f - U_i = U_i - U_i = 0 \quad \text{car cycle}$$

$$\Delta U = Q_c + Q_f + W \quad \text{1er principe}$$

Approche globale

Performance

Rappel : la performance d'une machine frigorifique

Cas de la pompe à chaleur

À partir du premier et du second principe appliqué à un cycle, on peut exprimer autrement l'efficacité de la pompe à chaleur

$$\Delta U = U_f - U_i = U_i - U_i = 0 \quad \text{car cycle}$$

$$\Delta U = Q_c + Q_f + W \quad \text{1er principe}$$

$$\text{donc} \quad Q_c + Q_f + W = 0 \quad \Longleftrightarrow \quad W = -Q_c - Q_f$$

$$e = -\frac{Q_c}{W} = \frac{Q_c}{Q_c + Q_f}$$

$$e = \frac{1}{1 + \frac{Q_f}{Q_c}}.$$

Approche globale

Performance

Rappel : la performance d'une machine frigorifique

Cas de la pompe à chaleur

À partir du premier et du second principe appliqué à un cycle, on peut exprimer autrement l'efficacité de la pompe à chaleur

$$\Delta S = S_f - S_i = S_i - S_i = 0 \quad \text{car cycle}$$

$$\Delta S = S_{rc} + S_{rf} + S_c \quad \text{2ème principe}$$

Approche globale

Performance

Rappel : la performance d'une machine frigorifique

Cas de la pompe à chaleur

À partir du premier et du second principe appliqué à un cycle, on peut exprimer autrement l'efficacité de la pompe à chaleur

$$\Delta S = S_f - S_i = S_i - S_i = 0 \quad \text{car cycle}$$

$$\Delta S = S_{rc} + S_{rf} + S_c \quad \text{2ème principe}$$

$$\text{donc} \quad S_{rc} + S_{rf} + S_c = 0 \quad \Longleftrightarrow \quad \frac{Q_c}{T_c} + \frac{Q_f}{T_f} + S_c = 0$$

$$Q_f = -Q_c \frac{T_f}{T_c} - T_f S_c$$

$$e = \frac{1}{1 + \frac{Q_f}{Q_c}} = \frac{1}{1 - \frac{T_f}{T_c} - \frac{T_f S_c}{Q_c}}.$$

Approche globale

Performance

Rappel : la performance d'une machine frigorifique

Cas de la pompe à chaleur

À partir du premier et du second principe appliqué à un cycle, on peut exprimer autrement l'efficacité de la pompe à chaleur. Dans le cas d'un cycle réversible $S_c = 0$, l'efficacité atteint sa valeur maximale appelée

efficacité de Carnot ❤️

$$e_C = \frac{1}{1 - \frac{T_f}{T_c}}$$
$$e_C = \frac{T_c}{T_c - T_f} \cdot \text{❤️}$$

On constate que l'efficacité d'une pompe à chaleur peut être supérieure à 1.

Approche globale

Performance

Rappel : la performance d'une machine frigorifique

Cas de la pompe à chaleur

À partir du premier et du second principe appliqué à un cycle, on peut exprimer autrement l'efficacité de la pompe à chaleur. Dans le cas d'un cycle réversible $S_c = 0$, l'efficacité atteint sa valeur maximale appelée **efficacité de Carnot** ❤️

$$e_C = \frac{1}{1 - \frac{T_f}{T_c}}$$
$$e_C = \frac{T_c}{T_c - T_f} \cdot \text{❤️}$$

On constate que l'efficacité d'une pompe à chaleur peut être supérieure à 1.

Approche globale

Performance

Rappel : la performance d'une machine frigorifique

Cas de la machine réfrigérante

Approche globale

Performance

Rappel : la performance d'une machine frigorifique

Cas de la machine réfrigérante

Elle correspond à son efficacité notée e ou son coefficient de performance frigorifique noté COP. ❤️

- L'énergie intéressante à récupérer est :

Approche globale

Performance

Rappel : la performance d'une machine frigorifique

Cas de la machine réfrigérante

Elle correspond à son efficacité notée e ou son coefficient de performance frigorifique noté COP. ❤️

- L'énergie intéressante à récupérer est : la chaleur prise à la source froide (l'intérieur) $Q_f > 0$.

Approche globale

Performance

Rappel : la performance d'une machine frigorifique

Cas de la machine réfrigérante

Elle correspond à son efficacité notée e ou son coefficient de performance frigorifique noté COP. ❤️

- L'énergie intéressante à récupérer est : la chaleur prise à la source froide (l'intérieur) $Q_f > 0$.
- L'énergie coûteuse à dépenser est :

Approche globale

Performance

Rappel : la performance d'une machine frigorifique

Cas de la machine réfrigérante

Elle correspond à son efficacité notée e ou son coefficient de performance frigorifique noté COP. ❤️

- L'énergie intéressante à récupérer est : la chaleur prise à la source froide (l'intérieur) $Q_f > 0$.
- L'énergie coûteuse à dépenser est : le travail des parties mobiles récupéré $W > 0$.

Approche globale

Performance

Rappel : la performance d'une machine frigorifique

Cas de la machine réfrigérante

Elle correspond à son efficacité notée e ou son coefficient de performance frigorifique noté COP. ❤️

- L'énergie intéressante à récupérer est : la chaleur prise à la source froide (l'intérieur) $Q_f > 0$.
- L'énergie coûteuse à dépenser est : le travail des parties mobiles récupéré $W > 0$.
- L'efficacité est donc

Approche globale

Performance

Rappel : la performance d'une machine frigorifique

Cas de la machine réfrigérante

Elle correspond à son efficacité notée e ou son coefficient de performance frigorifique noté COP. ❤️

- L'énergie intéressante à récupérer est : la chaleur prise à la source froide (l'intérieur) $Q_f > 0$.
- L'énergie coûteuse à dépenser est : le travail des parties mobiles récupéré $W > 0$.
- L'efficacité est donc

$$e = \frac{Q_f}{W} = \frac{\mathcal{P}_f}{\mathcal{P}_m}$$

avec $\mathcal{P}_m$ et $\mathcal{P}_f$ les puissances mécanique et thermique de la source froide.

Approche globale

Performance

Rappel : la performance d'une machine frigorifique

Cas de la machine réfrigérante

À partir du premier et du second principe appliqué à un cycle, on peut exprimer autrement l'efficacité de la machine réfrigérante

Approche globale

Performance

Rappel : la performance d'une machine frigorifique

Cas de la machine réfrigérante

À partir du premier et du second principe appliqué à un cycle, on peut exprimer autrement l'efficacité de la machine réfrigérante

$$\Delta U = U_f - U_i = U_i - U_i = 0 \quad \text{car cycle}$$

$$\Delta U = Q_c + Q_f + W \quad \text{1er principe}$$

Approche globale

Performance

Rappel : la performance d'une machine frigorifique

Cas de la machine réfrigérante

À partir du premier et du second principe appliqué à un cycle, on peut exprimer autrement l'efficacité de la machine réfrigérante

$$\Delta U = U_f - U_i = U_i - U_i = 0 \quad \text{car cycle}$$

$$\Delta U = Q_c + Q_f + W \quad \text{1er principe}$$

$$\text{donc} \quad Q_c + Q_f + W = 0 \quad \Longleftrightarrow \quad W = -Q_c - Q_f$$

$$e = \frac{Q_f}{W} = \frac{Q_f}{-Q_c - Q_f}$$

$$e = \frac{1}{-1 - \frac{Q_c}{Q_f}}.$$

Approche globale

Performance

Rappel : la performance d'une machine frigorifique

Cas de la machine réfrigérante

À partir du premier et du second principe appliqué à un cycle, on peut exprimer autrement l'efficacité de la machine réfrigérante

$$\Delta S = S_f - S_i = S_i - S_i = 0 \quad \text{car cycle}$$

$$\Delta S = S_{rc} + S_{rf} + S_c \quad \text{2ème principe}$$

Approche globale

Performance

Rappel : la performance d'une machine frigorifique

Cas de la machine réfrigérante

À partir du premier et du second principe appliqué à un cycle, on peut exprimer autrement l'efficacité de la machine réfrigérante

$$\Delta S = S_f - S_i = S_i - S_i = 0 \quad \text{car cycle}$$

$$\Delta S = S_{rc} + S_{rf} + S_c \quad \text{2ème principe}$$

$$\text{donc} \quad S_{rc} + S_{rf} + S_c = 0 \quad \Longleftrightarrow \quad \frac{Q_c}{T_c} + \frac{Q_f}{T_f} + S_c = 0$$

$$Q_c = -Q_f \frac{T_c}{T_f} - T_c S_c$$

$$e = \frac{1}{-1 - \frac{Q_c}{Q_f}} = \frac{1}{-1 + \frac{T_c}{T_f} + \frac{T_c S_c}{Q_f}}.$$

Approche globale

Performance

Rappel : la performance d'une machine frigorifique

Cas de la machine réfrigérante

À partir du premier et du second principe appliqué à un cycle, on peut exprimer autrement l'efficacité de la machine réfrigérante. Dans le cas d'un cycle réversible $S_c = 0$, l'efficacité atteint sa valeur maximale appelée **efficacité de Carnot** ❤️

$$e_C = \frac{1}{-1 + \frac{T_c}{T_f}}$$
$$e_C = \frac{T_f}{T_c - T_f} \cdot \text{❤️}$$

On constate que l'efficacité d'une machine réfrigérante peut être supérieure à 1.

Approche globale

Performance

Rappel : la performance d'une machine frigorifique

Cas de la machine réfrigérante

À partir du premier et du second principe appliqué à un cycle, on peut exprimer autrement l'efficacité de la machine réfrigérante. Dans le cas d'un cycle réversible $S_c = 0$, l'efficacité atteint sa valeur maximale appelée **efficacité de Carnot** ❤️

$$e_C = \frac{1}{-1 + \frac{T_c}{T_f}}$$
$$e_C = \frac{T_f}{T_c - T_f} \cdot \text{❤️}$$

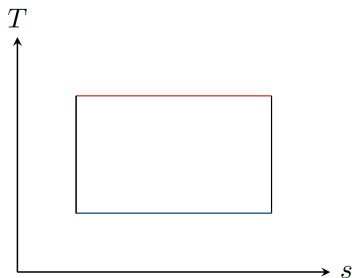
On constate que l'efficacité d'une machine réfrigérante peut être supérieure à 1.

Approche globale

Performance

Le cycle qui donne le meilleur rendement ou la meilleure efficacité selon le type de machine ditherme est le **cycle de Carnot**. Il est totalement **réversible**, donc sans aucune inhomogénéité puisque ce sont les sources d'irréversibilité. ❤️

Le cycle de Carnot est composé de **deux isothermes** et de **deux adiabatiques réversibles** (soit deux isentropiques). Ainsi il correspond à un rectangle sur un diagramme entropique. ❤️



Pour éviter les inhomogénéités, le cycle est forcément quasi-statique, donc l'utilisation de l'énergie est optimale mais elle prend un temps infini...

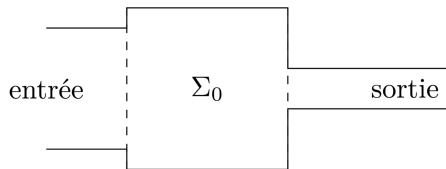
Plan

- 1 Introduction
- 2 Approche globale
 - Sens des échanges d'énergie dans une machine ditherme
 - Performance
- 3 Principes de la thermodynamiques pour un fluide en écoulement
 - Du système ouvert à un système fermé
 - Bilan d'énergie : premier principe pour le système ouvert
 - Bilan d'entropie : deuxième principe pour le système ouvert
- 4 Quelques composants des installations industrielles
 - Détendeur
 - Compresseur, pompe et turbine
 - Échangeur thermique
- 5 Application à la pompe à chaleur air-eau
 - Structure
 - Étude du cycle sur le diagramme des frigoristes
 - Coefficient de performance

Principes de la thermodynamiques pour un fluide en écoulement

Du système ouvert à un système fermé

Considérons comme système le fluide en **écoulement permanent** dans la machine. Comme nous l'avons fait pour établir le **bilan d'énergie cinétique**, nous devons définir une **surface de contrôle** délimitant le système.

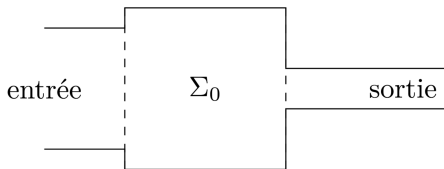


Si l'on choisit la surface Σ_0 , le système est

Principes de la thermodynamiques pour un fluide en écoulement

Du système ouvert à un système fermé

Considérons comme système le fluide en **écoulement permanent** dans la machine. Comme nous l'avons fait pour établir le **bilan d'énergie cinétique**, nous devons définir une **surface de contrôle** délimitant le système.



Si l'on choisit la surface Σ_0 , le système est **ouvert**. Or nous ne pouvons utiliser les **théorèmes de mécanique** et les **principes de thermodynamique** uniquement sur des **systèmes fermés**.

Principes de la thermodynamiques pour un fluide en écoulement

Du système ouvert à un système fermé

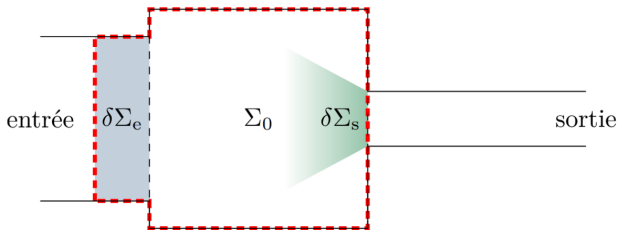
Il nous faut définir un système fermé qui sera constitué en partie de la surface Σ_0 .

Principes de la thermodynamiques pour un fluide en écoulement

Du système ouvert à un système fermé

Il nous faut définir un système fermé qui sera constitué en partie de la surface Σ_0 .

On considère à l'instant initial t le système composé de $\delta\Sigma_e$, soit le fluide qui va entrer dans Σ_0 durant dt , et du fluide dans Σ_0 . Il forme le système total $\Sigma_{\text{tot}}(t)$.

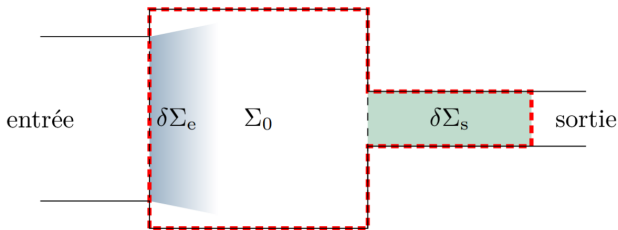


Principes de la thermodynamiques pour un fluide en écoulement

Du système ouvert à un système fermé

Il nous faut définir un système fermé qui sera constitué en partie de la surface Σ_0 .

On considère à l'instant final $t + dt$ le système composé de $\delta\Sigma_s$, soit le fluide qui est sorti de Σ_0 durant dt , et du fluide dans Σ_0 . Il forme le système total $\Sigma_{\text{tot}}(t + dt)$.



Principes de la thermodynamiques pour un fluide en écoulement

Du système ouvert à un système fermé

Il nous faut définir un système fermé qui sera constitué en partie de la surface Σ_0 .

Au final, dans le système total Σ_{tot} , on suit bien **les mêmes molécules de fluide** durant dt . Il respecte donc bien la définition d'un système. fermé que nous avons isolé par la pensée.

Principes de la thermodynamiques pour un fluide en écoulement

Bilan d'énergie : premier principe pour le système ouvert

Appliquons le **premier principe de la thermodynamique** sur le système Σ_{tot} entre t et dt : faisons son **bilan d'énergie**.

Attention : ici le système subit des variations de vitesse macroscopique et d'altitude, il y a donc variation de

On n'étudie donc pas son énergie interne U mais son énergie totale E avec

$$E =$$
$$dE =$$

Principes de la thermodynamiques pour un fluide en écoulement

Bilan d'énergie : premier principe pour le système ouvert

Appliquons le **premier principe de la thermodynamique** sur le système Σ_{tot} entre t et dt : faisons son **bilan d'énergie**.

Attention : ici le système subit des variations de vitesse macroscopique et d'altitude, il y a donc variation de son énergie cinétique macroscopique E_c et de son énergie potentielle de pesanteur extérieure E_p . On n'étudie donc pas son énergie interne U mais son énergie totale E avec

$$E =$$
$$dE =$$

Principes de la thermodynamiques pour un fluide en écoulement

Bilan d'énergie : premier principe pour le système ouvert

Appliquons le **premier principe de la thermodynamique** sur le système Σ_{tot} entre t et dt : faisons son **bilan d'énergie**.

Attention : ici le système subit des variations de vitesse macroscopique et d'altitude, il y a donc variation de son énergie cinétique macroscopique E_c et de son énergie potentielle de pesanteur extérieure E_p . On n'étudie donc pas son énergie interne U mais son énergie totale E avec

$$E = U + E_c + E_p$$
$$dE = dU + dE_c + dE_p.$$

Principes de la thermodynamiques pour un fluide en écoulement

Bilan d'énergie : premier principe pour le système ouvert

Décrivons cette variation d'énergie totale pour le système totale

$$\delta E = E(\text{tot}(t + dt)) - E(\Sigma_{\text{tot}}(t))$$

Principes de la thermodynamiques pour un fluide en écoulement

Bilan d'énergie : premier principe pour le système ouvert

Décrivons cette variation d'énergie totale pour le système totale

$$\begin{aligned}\delta E &= E(\text{tot}(t + dt)) - E(\Sigma_{\text{tot}}(t)) \\ &= [E(\Sigma_0(t + dt)) + E_s] - [E(\Sigma_0(t)) + E_e] \\ &= [E(\Sigma_0(t + dt)) + \delta m_s u_s + \delta m_s e_{c,s} + \delta m e_{p,s}] - [E(\Sigma_0(t)) + \delta m_e u_e + \delta m_e e_{c,e} + \delta m e_{p,e}].\end{aligned}$$

En régime permanent

De plus

Principes de la thermodynamiques pour un fluide en écoulement

Bilan d'énergie : premier principe pour le système ouvert

Décrivons cette variation d'énergie totale pour le système totale

$$\begin{aligned}\delta E &= E(\text{tot}(t + dt)) - E(\Sigma_{\text{tot}}(t)) \\ &= [E(\Sigma_0(t + dt)) + E_s] - [E(\Sigma_0(t)) + E_e] \\ &= [E(\Sigma_0(t + dt)) + \delta m_s u_s + \delta m_s e_{c,s} + \delta m e_{p,s}] - [E(\Sigma_0(t)) + \delta m_e u_e + \delta m_e e_{c,e} + \delta m e_{p,e}].\end{aligned}$$

En régime permanent $E(\Sigma_0(t + dt)) = E(\Sigma_0(t))$. De plus

Principes de la thermodynamiques pour un fluide en écoulement

Bilan d'énergie : premier principe pour le système ouvert

Décrivons cette variation d'énergie totale pour le système totale

$$\begin{aligned}\delta E &= E(\text{tot}(t + dt)) - E(\Sigma_{\text{tot}}(t)) \\ &= [E(\Sigma_0(t + dt)) + E_s] - [E(\Sigma_0(t)) + E_e] \\ &= [E(\Sigma_0(t + dt)) + \delta m_s u_s + \delta m_s e_{c,s} + \delta m e_{p,s}] - [E(\Sigma_0(t)) + \delta m_e u_e + \delta m_e e_{c,e} + \delta m e_{p,e}].\end{aligned}$$

En régime permanent $E(\Sigma_0(t + dt)) = E(\Sigma_0(t))$. De plus $D_m = \text{cst}$, or $D_m = \delta m_e dt$ et $D_m = \delta m_s dt$, donc $\delta m_e = \delta m_s \equiv \delta m$. Donc

$$dE =$$

Principes de la thermodynamiques pour un fluide en écoulement

Bilan d'énergie : premier principe pour le système ouvert

Décrivons cette variation d'énergie totale pour le système totale

$$\begin{aligned}\delta E &= E(\text{tot}(t + dt)) - E(\Sigma_{\text{tot}}(t)) \\ &= [E(\Sigma_0(t + dt)) + E_s] - [E(\Sigma_0(t)) + E_e] \\ &= [E(\Sigma_0(t + dt)) + \delta m_s u_s + \delta m_s e_{c,s} + \delta m e_{p,s}] - [E(\Sigma_0(t)) + \delta m_e u_e + \delta m_e e_{c,e} + \delta m e_{p,e}].\end{aligned}$$

En régime permanent $E(\Sigma_0(t + dt)) = E(\Sigma_0(t))$. De plus $D_m = \text{cst}$, or $D_m = \delta m_e dt$ et $D_m = \delta m_s dt$, donc $\delta m_e = \delta m_s \equiv \delta m$. Donc

$$\begin{aligned}dE &= \delta m [(u_s + e_{c,s} + e_{p,s}) - (u_e + e_{c,e} + e_{p,e})] \\ &= \delta m \left[\left(u_s + \frac{1}{2} V_s^2 + g z_s \right) - \left(u_e + \frac{1}{2} V_e^2 + g z_e \right) \right].\end{aligned}$$

Principes de la thermodynamiques pour un fluide en écoulement

Bilan d'énergie : premier principe pour le système ouvert

Appliquons alors le premier principe de la thermodynamique sur le système Σ_{tot} entre t et dt , il vient que

$$dE = \delta Q + \delta W + \delta W_i.$$

Principes de la thermodynamiques pour un fluide en écoulement

Bilan d'énergie : premier principe pour le système ouvert

Appliquons alors le premier principe de la thermodynamique sur le système Σ_{tot} entre t et dt , il vient que

$$dE = \delta Q + \delta W + \delta W_i.$$

Avec δQ le **transfert thermique** fourni au fluide Σ_{tot} par l'extérieur.

Principes de la thermodynamiques pour un fluide en écoulement

Bilan d'énergie : premier principe pour le système ouvert

Appliquons alors le premier principe de la thermodynamique sur le système Σ_{tot} entre t et dt , il vient que

$$dE = \delta Q + \delta W + \delta W_i.$$

Avec δW le **travail des forces de pression ou travail de transvasement** fourni au fluide Σ_{tot} par l'extérieur. On a montré précédemment que ce travail correspond à la différence des travaux de pression d'admission côté entrée et de refoulement côté sortie du système

$$\delta W =$$

Principes de la thermodynamiques pour un fluide en écoulement

Bilan d'énergie : premier principe pour le système ouvert

Appliquons alors le premier principe de la thermodynamique sur le système Σ_{tot} entre t et dt , il vient que

$$dE = \delta Q + \delta W + \delta W_i.$$

Avec δW le **travail des forces de pression ou travail de transvasement** fourni au fluide Σ_{tot} par l'extérieur. On a montré précédemment que ce travail correspond à la différence des travaux de pression d'admission côté entrée et de refoulement côté sortie du système

$$\delta W = P_e \delta \tau_e - P_s \delta \tau_s$$

avec P_e et P_s les pressions à l'entrée et à la sortie, et $\delta \tau_e$ et $\delta \tau_s$ les volumes des systèmes entrant et sortant.

Principes de la thermodynamiques pour un fluide en écoulement

Bilan d'énergie : premier principe pour le système ouvert

Appliquons alors le premier principe de la thermodynamique sur le système Σ_{tot} entre t et dt , il vient que

$$dE = \delta Q + \delta W + \delta W_i.$$

Avec δW_i le **travail indiqué** qui correspond au travail mécanique algébriquement fourni au fluide par les **pièces mobiles d'une machine**. Il est positif si les pièces donnent du travail au fluide (ex : pompe), il est négatif si le fluide donne du travail aux pièces (ex : turbine). ❤️

Principes de la thermodynamiques pour un fluide en écoulement

Bilan d'énergie : premier principe pour le système ouvert

Si on associé l'expression obtenue décrivant la variation d'énergie totale et le premier principe, il vient que

$$\delta m \left[\left(u_s + \frac{1}{2} V_s^2 + g z_s \right) - \left(u_e + \frac{1}{2} V_e^2 + g z_e \right) \right] = \delta Q + \delta W + \delta W_i$$

$$\delta m \left[\left(u_s + \frac{1}{2} V_s^2 + g z_s \right) - \left(u_e + \frac{1}{2} V_e^2 + g z_e \right) \right] = \delta Q + P_e \delta \tau_e - P_s \delta \tau_s + \delta W_i.$$

Principes de la thermodynamiques pour un fluide en écoulement

Bilan d'énergie : premier principe pour le système ouvert

Si on associé l'expression obtenue décrivant la variation d'énergie totale et le premier principe, il vient que

$$\delta m \left[\left(u_s + \frac{1}{2} V_s^2 + g z_s \right) - \left(u_e + \frac{1}{2} V_e^2 + g z_e \right) \right] = \delta Q + \delta W + \delta W_i$$

$$\delta m \left[\left(u_s + \frac{1}{2} V_s^2 + g z_s \right) - \left(u_e + \frac{1}{2} V_e^2 + g z_e \right) \right] = \delta Q + P_e \delta \tau_e - P_s \delta \tau_s + \delta W_i.$$

On peut exprimer les volumes entrant et sortant en fonction des débits volumiques entrant et sortant, soit $D_{v,e} =$ et $D_{v,s} =$.

De plus si on considère que les fluides sont incompressibles en entrée et en sortie, il vient que $\delta \tau_e =$ et

$\delta m \tau_s =$. Ainsi

Principes de la thermodynamiques pour un fluide en écoulement

Bilan d'énergie : premier principe pour le système ouvert

Si on associé l'expression obtenue décrivant la variation d'énergie totale et le premier principe, il vient que

$$\delta m \left[\left(u_s + \frac{1}{2} V_s^2 + g z_s \right) - \left(u_e + \frac{1}{2} V_e^2 + g z_e \right) \right] = \delta Q + \delta W + \delta W_i$$

$$\delta m \left[\left(u_s + \frac{1}{2} V_s^2 + g z_s \right) - \left(u_e + \frac{1}{2} V_e^2 + g z_e \right) \right] = \delta Q + P_e \delta \tau_e - P_s \delta \tau_s + \delta W_i.$$

On peut exprimer les volumes entrant et sortant en fonction des débits volumiques entrant et sortant, soit $D_{v,e} = \frac{\delta \tau_e}{dt}$ et $D_{v,s} = \frac{\delta \tau_s}{dt}$.

De plus si on considère que les fluides sont incompressibles en entrée et en sortie, il vient que $\delta \tau_e =$ et

$\delta m \tau_s =$. Ainsi

Principes de la thermodynamiques pour un fluide en écoulement

Bilan d'énergie : premier principe pour le système ouvert

Si on associé l'expression obtenue décrivant la variation d'énergie totale et le premier principe, il vient que

$$\delta m \left[\left(u_s + \frac{1}{2} V_s^2 + g z_s \right) - \left(u_e + \frac{1}{2} V_e^2 + g z_e \right) \right] = \delta Q + \delta W + \delta W_i$$

$$\delta m \left[\left(u_s + \frac{1}{2} V_s^2 + g z_s \right) - \left(u_e + \frac{1}{2} V_e^2 + g z_e \right) \right] = \delta Q + P_e \delta \tau_e - P_s \delta \tau_s + \delta W_i.$$

On peut exprimer les volumes entrant et sortant en fonction des débits volumiques entrant et sortant, soit $D_{v,e} = \frac{\delta \tau_e}{dt}$ et $D_{v,s} = \frac{\delta \tau_s}{dt}$. De plus si on considère que les fluides sont incompressibles en entrée et en sortie, il vient que $\delta \tau_e = D_{v,e} dt = \frac{D_m}{\rho_e} dt = \frac{\delta m}{\rho_e} = \delta m v_e$ et $\delta m \tau_s = D_{v,s} dt = \frac{D_m}{\rho_s} dt = \frac{\delta m}{\rho_s} = \delta m v_s$. Ainsi

Principes de la thermodynamiques pour un fluide en écoulement

Bilan d'énergie : premier principe pour le système ouvert

Si on associé l'expression obtenue décrivant la variation d'énergie totale et le premier principe, il vient que

$$\delta m \left[\left(u_s + \frac{1}{2} V_s^2 + g z_s \right) - \left(u_e + \frac{1}{2} V_e^2 + g z_e \right) \right] = \delta Q + \delta W + \delta W_i$$

$$\delta m \left[\left(u_s + \frac{1}{2} V_s^2 + g z_s \right) - \left(u_e + \frac{1}{2} V_e^2 + g z_e \right) \right] = \delta Q + P_e \delta \tau_e - P_s \delta \tau_s + \delta W_i.$$

On peut exprimer les volumes entrant et sortant en fonction des débits volumiques entrant et sortant, soit $D_{v,e} = \frac{\delta \tau_e}{dt}$ et $D_{v,s} = \frac{\delta \tau_s}{dt}$. De plus si on considère que les fluides sont incompressibles en entrée et en sortie, il vient que $\delta \tau_e = D_{v,e} dt = \frac{D_m}{\rho_e} dt = \frac{\delta m}{\rho_e} = \delta m v_e$ et

$\delta m \tau_s = D_{v,s} dt = \frac{D_m}{\rho_s} dt = \frac{\delta m}{\rho_s} = \delta m v_s$. Ainsi

$$\delta m \left[\left(u_s + \frac{1}{2} V_s^2 + g z_s \right) - \left(u_e + \frac{1}{2} V_e^2 + g z_e \right) \right] = \delta Q + \delta m (P_e v_e - P_s v_s) + \delta W_i$$

Principes de la thermodynamiques pour un fluide en écoulement

Bilan d'énergie : premier principe pour le système ouvert

Soit

$$\delta m \left[\left(u_s + P_s v_s + \frac{1}{2} V_s^2 + g z_s \right) - \left(u_e + P_e v_e + \frac{1}{2} V_e^2 + g z_e \right) \right] = \delta Q + \delta W_i.$$

On peut utiliser la définition de l'enthalpie massique $h =$ et donc

Principes de la thermodynamiques pour un fluide en écoulement

Bilan d'énergie : premier principe pour le système ouvert

Soit

$$\delta m \left[\left(u_s + P_s v_s + \frac{1}{2} V_s^2 + g z_s \right) - \left(u_e + P_e v_e + \frac{1}{2} V_e^2 + g z_e \right) \right] = \delta Q + \delta W_i.$$

On peut utiliser la définition de l'enthalpie massique $h = u + P v$ et donc

Principes de la thermodynamiques pour un fluide en écoulement

Bilan d'énergie : premier principe pour le système ouvert

Soit

$$\delta m \left[\left(u_s + P_s v_s + \frac{1}{2} V_s^2 + g z_s \right) - \left(u_e + P_e v_e + \frac{1}{2} V_e^2 + g z_e \right) \right] = \delta Q + \delta W_i.$$

On peut utiliser la définition de l'enthalpie massique $h = u + P v$ et donc

$$\delta m \left[\left(h_s + \frac{1}{2} V_s^2 + g z_s \right) - \left(h_e + \frac{1}{2} V_e^2 + g z_e \right) \right] = \delta Q + \delta W_i$$
$$\left(h_s + \frac{1}{2} V_s^2 + g z_s \right) - \left(h_e + \frac{1}{2} V_e^2 + g z_e \right) = q + w_i \quad \text{❤}$$

on trouve l'expression du **premier principe thermodynamique industriel** impliquant les **chaleur et travail indiqué massiques** q et w_i en $\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}$.



Principes de la thermodynamiques pour un fluide en écoulement

Bilan d'énergie : premier principe pour le système ouvert

On peut aussi récrire le premier principe industrielle en terme de bilan de puissance en divisant l'expression n'impliquant pas les grandeurs massique par dt

$$\delta m \left[\left(h_s + \frac{1}{2} V_s^2 + g z_s \right) - \left(h_e + \frac{1}{2} V_e^2 + g z_e \right) \right] = \delta Q + \delta W_i$$

Principes de la thermodynamiques pour un fluide en écoulement

Bilan d'énergie : premier principe pour le système ouvert

On peut aussi récrire le premier principe industrielle en terme de bilan de puissance en divisant l'expression n'impliquant pas les grandeurs massique par dt

$$\begin{aligned}\delta m \left[\left(h_s + \frac{1}{2} V_s^2 + g z_s \right) - \left(h_e + \frac{1}{2} V_e^2 + g z_e \right) \right] &= \delta Q + \delta W_i \\ \frac{\delta m}{dt} \left[\left(h_s + \frac{1}{2} V_s^2 + g z_s \right) - \left(h_e + \frac{1}{2} V_e^2 + g z_e \right) \right] &= \frac{\delta Q}{dt} + \frac{\delta W_i}{dt} \\ D_m \left[\left(h_s + \frac{1}{2} V_s^2 + g z_s \right) - \left(h_e + \frac{1}{2} V_e^2 + g z_e \right) \right] &= \mathcal{P}_{th} + \mathcal{P}_i \quad \text{❤️}\end{aligned}$$

avec $\mathcal{P}_{th}$ et $\mathcal{P}_i$ les **puissances thermique et indiquée** reçues par le fluide depuis l'extérieur en W.

Principes de la thermodynamiques pour un fluide en écoulement

Bilan d'énergie : premier principe pour le système ouvert

On peut faire le lien entre les grandeurs massiques et les puissances à partir du débit massique

Principes de la thermodynamiques pour un fluide en écoulement

Bilan d'énergie : premier principe pour le système ouvert

On peut faire le lien entre les grandeurs massiques et les puissances à partir du débit massique

$$\mathcal{P}_{th} = \frac{\delta Q}{dt} = \frac{q \delta m}{dt} = D_m q \quad \heartsuit$$
$$\mathcal{P}_i = \frac{\delta W_i}{dt} = \frac{w_i \delta m}{dt} = D_m w_i. \quad \heartsuit$$

Principes de la thermodynamiques pour un fluide en écoulement

Bilan d'énergie : premier principe pour le système ouvert

On peut faire le lien entre les grandeurs massiques et les puissances à partir du débit massique

$$\mathcal{P}_{th} = \frac{\delta Q}{dt} = \frac{q \delta m}{dt} = D_m q \quad \text{♥}$$
$$\mathcal{P}_i = \frac{\delta W_i}{dt} = \frac{w_i \delta m}{dt} = D_m w_i. \quad \text{♥}$$

On peut également trouver la deuxième notation suivante pour le premier principe industriel

$$\left(h_s + \frac{1}{2} V_s^2 + g z_s \right) - \left(h_e + \frac{1}{2} V_e^2 + g z_e \right) = q + w_i$$
$$\Delta_{es} \left(h + \frac{1}{2} V^2 + g z \right) = q + w_i.$$

Principes de la thermodynamiques pour un fluide en écoulement

Bilan d'entropie : deuxième principe pour le système ouvert

La démarche est identique pour procéder à un **bilan d'entropie**, et la démonstration est même plus simple car seuls les transferts thermiques permettent d'échanger de l'entropie. On montre qu'il vient que

$$s_s - s_e = s_r + s_c = \frac{q}{T_{\text{ext}}} + s_c \quad \text{♥}$$

avec s_r et s_c en $\text{J} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{kg}^{-1}$ les entropies massiques reçue et créée au sein de Σ_{tot} .

Les causes de création d'entropie au sein d'un écoulement sont les causes classiques **d'irréversibilité** : inhomogénéités (le plus souvent de température) et frottements, notamment dûs à la viscosité.

Principes de la thermodynamiques pour un fluide en écoulement

Bilan d'entropie : deuxième principe pour le système ouvert

Le **bilan d'entropie par unité de temps** s'obtient en multipliant la relation précédente par le débit massique $D_m = \frac{\delta m}{dt}$

$$D_m (s_s - s_e) = \frac{\delta S_r}{dt} + \frac{\delta S_c}{dt} = \frac{\mathcal{P}_{th}}{T_{ext}} + \sigma \quad \text{♥}$$

avec $\mathcal{P}_{th} = \frac{\delta Q}{dt}$ la puissance thermique reçue par Σ_{tot} en W et σ le taux de création d'entropie en $J \cdot K^{-1} \cdot s^{-1}$.

Plan

- 1 Introduction
- 2 Approche globale
 - Sens des échanges d'énergie dans une machine ditherme
 - Performance
- 3 Principes de la thermodynamiques pour un fluide en écoulement
 - Du système ouvert à un système fermé
 - Bilan d'énergie : premier principe pour le système ouvert
 - Bilan d'entropie : deuxième principe pour le système ouvert
- 4 Quelques composants des installations industrielles
 - Détendeur
 - Compresseur, pompe et turbine
 - Échangeur thermique
- 5 Application à la pompe à chaleur air-eau
 - Structure
 - Étude du cycle sur le diagramme des frigoristes
 - Coefficient de performance

Quelques composants des installations industrielles

Détendeur

Appliquons les notions que nous venons de rencontrer à des éléments caractéristiques d'installations industrielles.

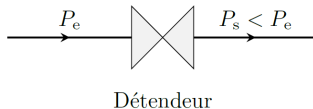
Quelques composants des installations industrielles

Détendeur

Un **détendeur** permet de diminuer la pression d'un fluide sans échange de travail, simplement par un phénomène de **perte de charge**. ❤️



Détendeur d'un frigo domestique.



Cette chute de pression s'accompagne selon les situations d'une variation de température, de masse volumique et/ou d'un changement d'état. La transformation subie par le fluide au sein du détendeur est appelée **détente** ou **laminage**.

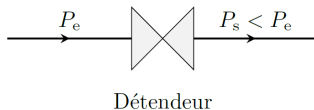
Quelques composants des installations industrielles

Détendeur

En pratique, un détendeur est caractérisé par sa pression d'entrée et sa pression de sortie, ou de façon équivalente la pression d'entrée et la chute de pression qu'il impose.



Détendeur d'un frigo domestique.



Détendeur

Il s'agit d'un dispositif de type vanne ou soupape (comme sur une cocotte-minute), ou encore d'un long capillaire (conduite très fine) enroulé dans lequel la pression diminue sous l'effet des pertes de charge. Un détendeur ne comporte **pas de pièces mobiles**.

Quelques composants des installations industrielles

Détendeur

Appliquons le premier **principe industriel** au détendeur :

Il vient que

Quelques composants des installations industrielles

Détendeur

Appliquons le premier **principe industriel** au détendeur :

- son **travail indiqué massique** est w_i

Il vient que

Quelques composants des installations industrielles

Détendeur

Appliquons le premier **principe industriel** au détendeur :

- son **travail indiqué massique** est $w_i = 0$ car il n'y a pas de pièce mobile

Il vient que

Quelques composants des installations industrielles

Détendeur

Appliquons le premier **principe industriel** au détendeur :

- son **travail indiqué massique** est $w_i = 0$ car il n'y a pas de pièce mobile
- son **transfert thermique massique** est q

Il vient que

Quelques composants des installations industrielles

Détendeur

Appliquons le premier **principe industriel** au détendeur :

- son **travail indiqué massique** est $w_i = 0$ car il n'y a pas de pièce mobile
- son **transfert thermique massique** est $q \simeq 0$ négligeable car le passage du fluide dans le détendeur est trop rapide pour les transferts thermique : on peut modéliser un détendeur par un système calorifugé



Il vient que

Quelques composants des installations industrielles

Détendeur

Appliquons le premier **principe industriel** au détendeur :

- son **travail indiqué massique** est $w_i = 0$ car il n'y a pas de pièce mobile
- son **transfert thermique massique** est $q \simeq 0$ négligeable car le passage du fluide dans le détendeur est trop rapide pour les transferts thermique : on peut modéliser un détendeur par un système calorifugé



- ses variations d'énergies cinétique et potentielle sont

Il vient que

Quelques composants des installations industrielles

Détendeur

Appliquons le premier **principe industriel** au détendeur :

- son **travail indiqué massique** est $w_i = 0$ car il n'y a pas de pièce mobile
- son **transfert thermique massique** est $q \simeq 0$ négligeable car le passage du fluide dans le détendeur est trop rapide pour les transferts thermique : on peut modéliser un détendeur par un système calorifugé



- ses variations d'énergies cinétique et potentielle sont supposées nulles.



Il vient que

Quelques composants des installations industrielles

Détendeur

Appliquons le premier **principe industriel** au détendeur :

- son **travail indiqué massique** est $w_i = 0$ car il n'y a pas de pièce mobile
- son **transfert thermique massique** est $q \simeq 0$ négligeable car le passage du fluide dans le détendeur est trop rapide pour les transferts thermique : on peut modéliser un détendeur par un système calorifugé



- ses variations d'énergies cinétique et potentielle sont supposées nulles.



Il vient que

$$\left(h_s + \frac{1}{2} V_s^2 + g z_s \right) - \left(h_e + \frac{1}{2} V_e^2 + g z_e \right) = q + w_i$$

Quelques composants des installations industrielles

Détendeur

Appliquons le premier **principe industriel** au détendeur :

- son **travail indiqué massique** est $w_i = 0$ car il n'y a pas de pièce mobile
- son **transfert thermique massique** est $q \simeq 0$ négligeable car le passage du fluide dans le détendeur est trop rapide pour les transferts thermique : on peut modéliser un détendeur par un système calorifugé



- ses variations d'énergies cinétique et potentielle sont supposées nulles.



Il vient que

$$\left(h_s + \frac{1}{2} V_s^2 + g z_s \right) - \left(h_e + \frac{1}{2} V_e^2 + g z_e \right) = q + w_i$$
$$h_s - h_e = 0 \quad \Longleftrightarrow \quad h_s = h_e.$$

Un fluide passant par un détendeur calorifugé subit une **transformation isenthalpique** (aussi appelée détente de Joule Thomson).



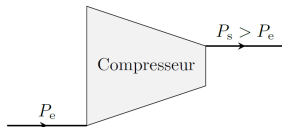
Quelques composants des installations industrielles

Compresseur, pompe et turbine

Un **compresseur** est un dispositif qui permet d'augmenter la pression d'un gaz par un procédé mécanique. Une **pompe** joue le même rôle pour un liquide. ❤️



Compresseur d'un climatiseur automobile.



La compression d'un gaz s'accompagne d'une variation de température et de masse volumique.

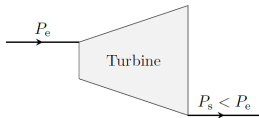
Quelques composants des installations industrielles

Compresseur, pompe et turbine

Une **turbine** est un dispositif tournant qui permet d'extraire un travail mécanique du fluide. ❤️



Turbine d'une centrale à gaz.



Le passage au travers d'une turbine entraîne au moins une chute de pression au sein du fluide, qui s'accompagne souvent d'une variation de température et/ou d'un changement d'état.

Quelques composants des installations industrielles

Compresseur, pompe et turbine

Appliquons le premier **principe industriel** au compresseur, à la pompe ou à la turbine :

Il vient que

Quelques composants des installations industrielles

Compresseur, pompe et turbine

Appliquons le premier **principe industriel** au compresseur, à la pompe ou à la turbine :

- son **travail indiqué massique** est w_i

Il vient que

Quelques composants des installations industrielles

Compresseur, pompe et turbine

Appliquons le premier **principe industriel** au compresseur, à la pompe ou à la turbine :

- son **travail indiqué massique** est $w_i < 0$ pour une turbine et $w_i > 0$ pour une pompe ou un compresseur

Il vient que

Quelques composants des installations industrielles

Compresseur, pompe et turbine

Appliquons le premier **principe industriel** au compresseur, à la pompe ou à la turbine :

- son **travail indiqué massique** est $w_i < 0$ pour une turbine et $w_i > 0$ pour une pompe ou un compresseur
- son **transfert thermique massique** est q

Il vient que

Quelques composants des installations industrielles

Compresseur, pompe et turbine

Appliquons le premier **principe industriel** au compresseur, à la pompe ou à la turbine :

- son **travail indiqué massique** est $w_i < 0$ pour une turbine et $w_i > 0$ pour une pompe ou un compresseur
- son **transfert thermique massique** est $q \simeq 0$ négligeable car le passage du fluide dans un compresseur, une pompe ou une turbine est trop rapide, on peut les modéliser par un système calorifugé ❤️

Il vient que

Quelques composants des installations industrielles

Compresseur, pompe et turbine

Appliquons le premier **principe industriel** au compresseur, à la pompe ou à la turbine :

- son **travail indiqué massique** est $w_i < 0$ pour une turbine et $w_i > 0$ pour une pompe ou un compresseur
- son **transfert thermique massique** est $q \simeq 0$ négligeable car le passage du fluide dans un compresseur, une pompe ou une turbine est trop rapide, on peut les modéliser par un système calorifugé 
- ses variations d'énergies cinétique et potentielle sont

Il vient que

Quelques composants des installations industrielles

Compresseur, pompe et turbine

Appliquons le premier **principe industriel** au compresseur, à la pompe ou à la turbine :

- son **travail indiqué massique** est $w_i < 0$ pour une turbine et $w_i > 0$ pour une pompe ou un compresseur
- son **transfert thermique massique** est $q \simeq 0$ négligeable car le passage du fluide dans un compresseur, une pompe ou une turbine est trop rapide, on peut les modéliser par un système calorifugé ❤️
- ses variations d'énergies cinétique et potentielle sont négligeables devant la variation d'enthalpie. ❤️

Il vient que

Quelques composants des installations industrielles

Compresseur, pompe et turbine

Appliquons le premier **principe industriel** au compresseur, à la pompe ou à la turbine :

- son **travail indiqué massique** est $w_i < 0$ pour une turbine et $w_i > 0$ pour une pompe ou un compresseur
- son **transfert thermique massique** est $q \simeq 0$ négligeable car le passage du fluide dans un compresseur, une pompe ou une turbine est trop rapide, on peut les modéliser par un système calorifugé ❤️
- ses variations d'énergies cinétique et potentielle sont négligeables devant la variation d'enthalpie. ❤️

Il vient que

$$\left(h_s + \frac{1}{2} V_s^2 + g z_s \right) - \left(h_e + \frac{1}{2} V_e^2 + g z_e \right) = q + w_i$$

Quelques composants des installations industrielles

Compresseur, pompe et turbine

Appliquons le premier **principe industriel** au compresseur, à la pompe ou à la turbine :

- son **travail indiqué massique** est $w_i < 0$ pour une turbine et $w_i > 0$ pour une pompe ou un compresseur
- son **transfert thermique massique** est $q \simeq 0$ négligeable car le passage du fluide dans un compresseur, une pompe ou une turbine est trop rapide, on peut les modéliser par un système calorifugé ❤️
- ses variations d'énergies cinétique et potentielle sont négligeables devant la variation d'enthalpie. ❤️

Il vient que

$$\left(h_s + \frac{1}{2} V_s^2 + g z_s \right) - \left(h_e + \frac{1}{2} V_e^2 + g z_e \right) = q + w_i$$

$$h_s - h_e = w_i \quad \text{ou} \quad D_m (h_s - h_e) = \mathcal{P}_i \quad \text{❤️}$$

pour une turbine ou un compresseur parfaitement calorifugé dans lequel les variations d'énergies cinétique et potentielle sont négligeables.

Quelques composants des installations industrielles

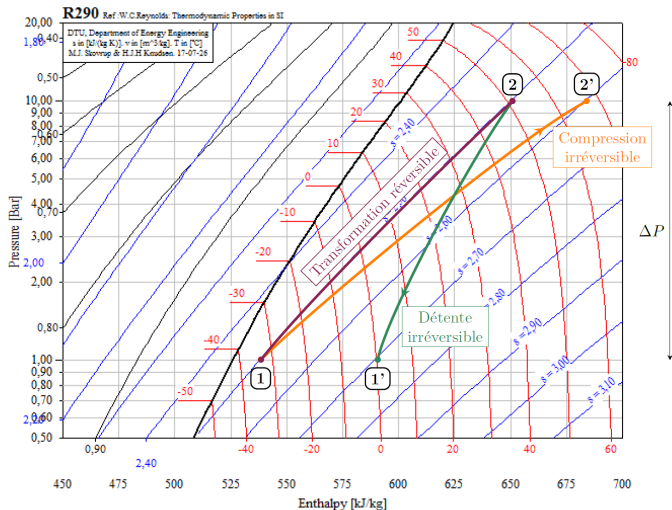
Compresseur, pompe et turbine

Une turbine ou un compresseur contiennent des pièces mobiles tournant à très grande vitesse : les **sources d'irréversibilité** y sont nombreuses, et elles ne sont pas sans impact sur les performances de l'installation.

Quelques composants des installations industrielles

Compresseur, pompe et turbine

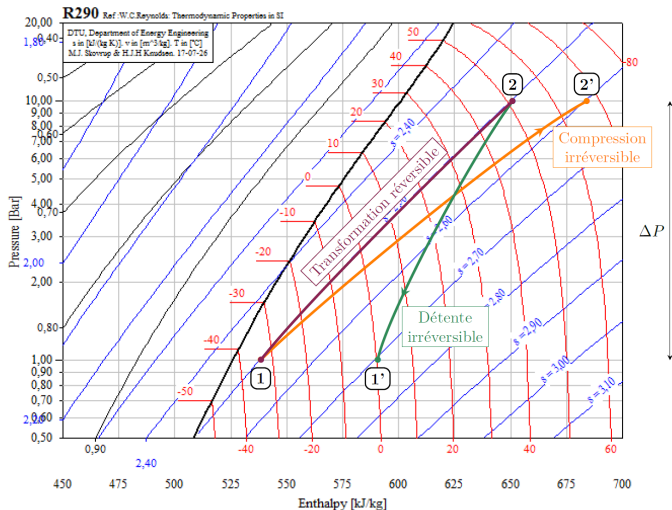
Prenons l'exemple d'une compression dans un compresseur ou d'une détente dans une turbine d'une quantité ΔP du fluide R290.



Quelques composants des installations industrielles

Compresseur, pompe et turbine

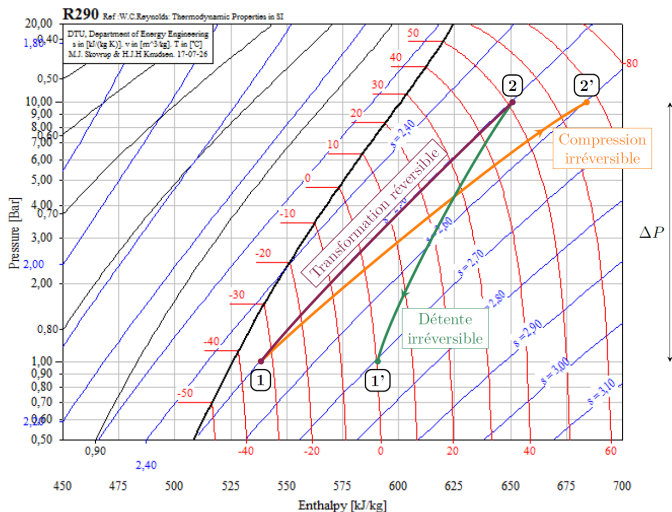
Compression réversible : de l'état initial 1 à l'état final 2 selon une isentropique car $q = 0$.



Quelques composants des installations industrielles

Compresseur, pompe et turbine

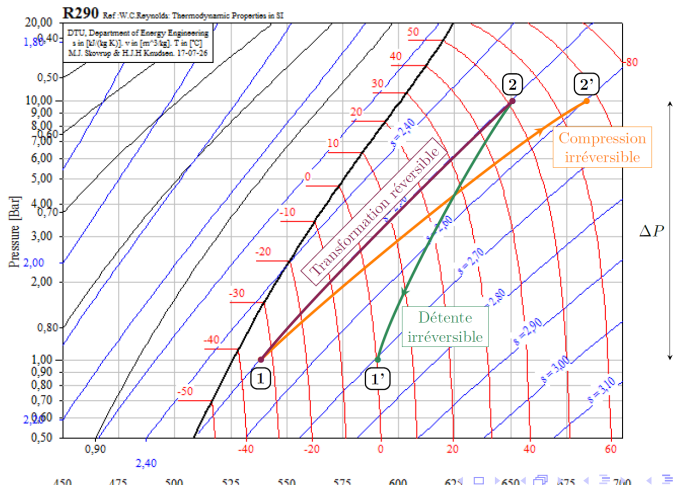
Compression irréversible : de l'état initial 1 à l'état final 2' car entropie finale supérieure à entropie initiale.



Quelques composants des installations industrielles

Compresseur, pompe et turbine

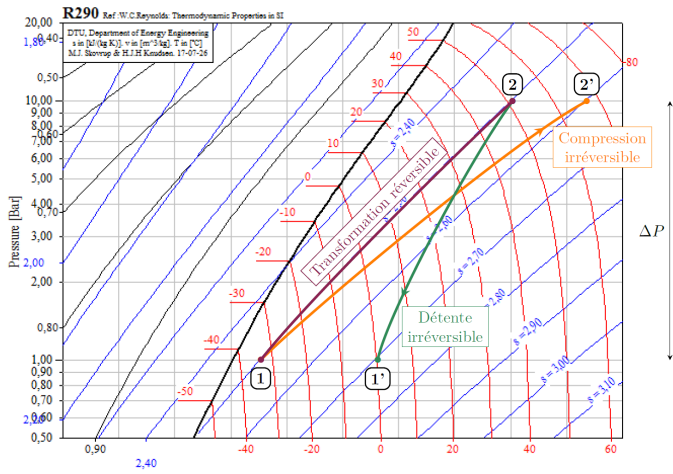
Compression irréversible : on voit d'abord que $h_{2'} > h_2$ donc d'après le premier principe industrielle $h_2 - h_1 = w_i < h_{2'} - h_1 = w_i'$. Pour comprimer le fluide du même ΔP le travail indiqué w_i' à fournir au fluide est plus important dans le cas irréversible.



Quelques composants des installations industrielles

Compresseur, pompe et turbine

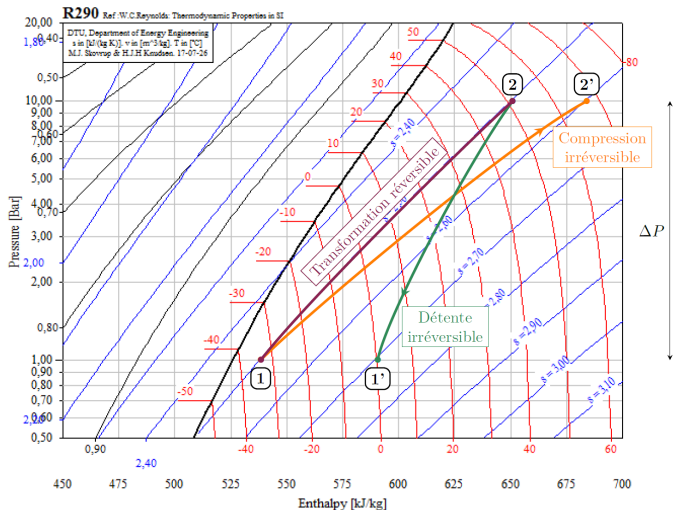
Compression irréversible : ensuite on voit que $T_{2'} > T_2$, la création d'entropie traduit une **mauvaise utilisation de l'énergie**, ici le travail utile supplémentaire par rapport au cas réversible sert à augmenter la température du fluide.



Quelques composants des installations industrielles

Compresseur, pompe et turbine

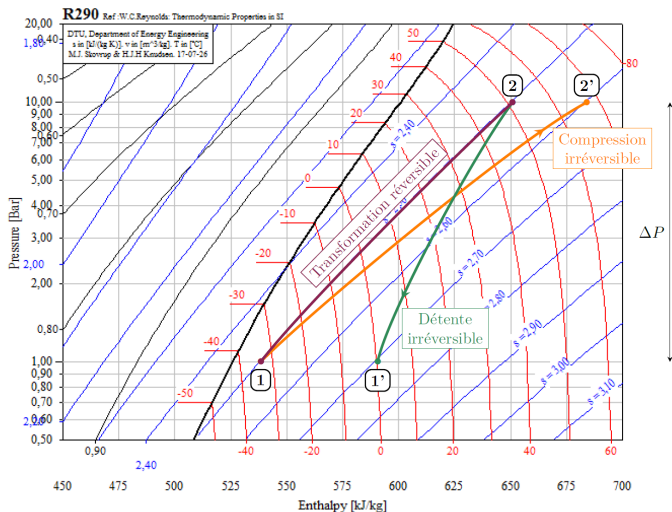
Détente réversible : de l'état initial 2 à l'état final 1 selon la même isentropique car $q = 0$.



Quelques composants des installations industrielles

Compresseur, pompe et turbine

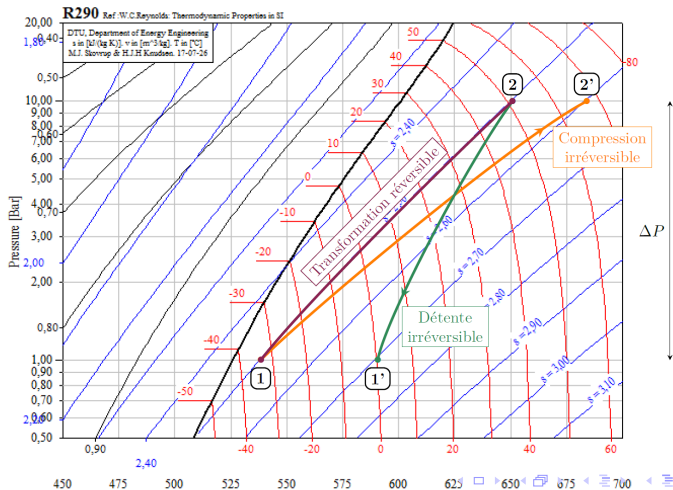
Détente irréversible : de l'état initial 2 à l'état final 1' car entropie finale supérieure à entropie initiale.



Quelques composants des installations industrielles

Compresseur, pompe et turbine

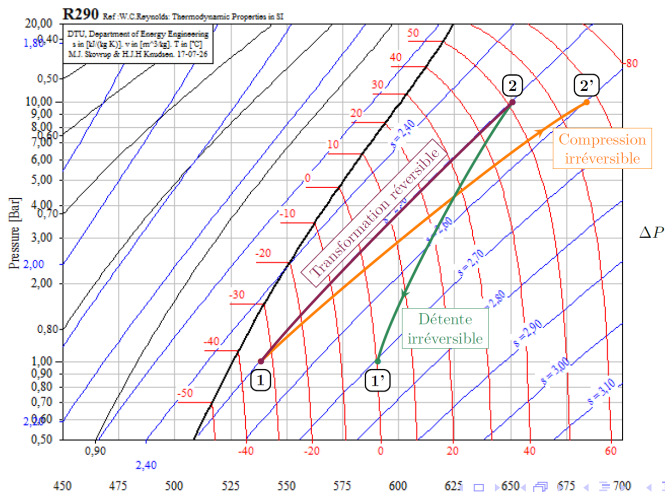
Détente irréversible : on voit d'abord que $h_{1'} > h_1$ donc d'après le premier principe industrielle $h_1 - h_2 = w_i < h_{1'} - h_2 = w'_i$ et $|w_i| > |w'_i|$. Pour détendre le fluide du même ΔP le travail indiqué w'_i donné à la turbine est moins important dans le cas irréversible.



Quelques composants des installations industrielles

Compresseur, pompe et turbine

Détente irréversible : ensuite on voit que $T_{1'} > T_1$, la création d'entropie traduit une **mauvaise utilisation de l'énergie**, ici le travail non donné à la turbine par rapport au cas réversible sert à augmenter la température du fluide.



Quelques composants des installations industrielles

Compresseur, pompe et turbine

Pour tenir compte de ses phénomènes d'irréversibilité, on caractérise les turbine et les compresseurs (pompes) par un **rendement isentropique** permettant de comparer le travail indiqué réel au travail indiqué dans le cas d'une transformation réversible. Ce rendement noté η est donc positif et toujours inférieur à 1.

Quelques composants des installations industrielles

Compresseur, pompe et turbine

Pour tenir compte de ses phénomènes d'irréversibilité, on caractérise les turbine et les compresseurs (pompes) par un **rendement isentropique** permettant de comparer le travail indiqué réel au travail indiqué dans le cas d'une transformation réversible. Ce rendement noté η est donc positif et toujours inférieur à 1.

- Rendement isentropique d'une turbine : $w_i > 0$ et $w_i^{\text{réel}} > w_i^{\text{rev}}$

$$\eta_{\text{turb}} = \frac{w_i^{\text{réel}}}{w_i^{\text{rev}}} = \frac{(h_s - h_e)^{\text{réel}}}{(h_s - h_e)^{\text{rev}}}.$$

Quelques composants des installations industrielles

Compresseur, pompe et turbine

Pour tenir compte de ses phénomènes d'irréversibilité, on caractérise les turbine et les compresseurs (pompes) par un **rendement isentropique** permettant de comparer le travail indiqué réel au travail indiqué dans le cas d'une transformation réversible. Ce rendement noté η est donc positif et toujours inférieur à 1.

- Rendement isentropique d'une turbine : $w_i > 0$ et $w_i^{\text{réel}} > w_i^{\text{rev}}$

$$\eta_{\text{turb}} = \frac{w_i^{\text{réel}}}{w_i^{\text{rev}}} = \frac{(h_s - h_e)^{\text{réel}}}{(h_s - h_e)^{\text{rev}}}.$$

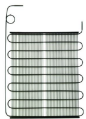
- Rendement isentropique d'un compresseur : $w_i < 0$ et $|w_i^{\text{réel}}| > |w_i^{\text{rev}}|$

$$\eta_{\text{comp}} = \frac{w_i^{\text{rev}}}{w_i^{\text{réel}}} = \frac{(h_s - h_e)^{\text{rev}}}{(h_s - h_e)^{\text{réel}}}.$$

Quelques composants des installations industrielles

Échangeur thermique

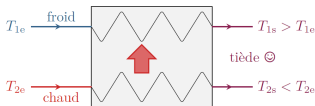
Un **échangeur thermique** permet un transfert thermique entre deux fluides sans les mélanger. Le passage au travers d'un échangeur thermique entraîne évidemment une variation de température, éventuellement un changement d'état, mais il est usuellement considéré comme **isobare**. ❤️



Condenseur arrière d'un frigo domestique



Échangeur tubulaire d'une chaudière.



Dans un échangeur simple flux, un seul écoulement est forcé, l'autre étant assuré par convection naturelle ; alors que dans un échangeur double flux les deux fluides sont en écoulement forcé.

Quelques composants des installations industrielles

Échangeur thermique

Quand un **changement d'état** a lieu dans un échangeur, celui-ci donne son nom à l'échangeur : on parle ainsi d'**évaporateur** ou de **condenseur** d'un frigo ou d'une pompe à chaleur.

Quelques composants des installations industrielles

Échangeur thermique

Appliquons le premier **principe industriel** à un échangeur simple flux :

Il vient que

Quelques composants des installations industrielles

Échangeur thermique

Appliquons le premier **principe industriel** à un échangeur simple flux :

- son **travail indiqué massique** est w_i

Il vient que

Quelques composants des installations industrielles

Échangeur thermique

Appliquons le premier **principe industriel** à un échangeur simple flux :

- son **travail indiqué massique** est $w_i = 0$ car il n'y a pas de pièce mobile

Il vient que

Quelques composants des installations industrielles

Échangeur thermique

Appliquons le premier **principe industriel** à un échangeur simple flux :

- son **travail indiqué massique** est $w_i = 0$ car il n'y a pas de pièce mobile
- son **transfert thermique massique** est q

Il vient que

Quelques composants des installations industrielles

Échangeur thermique

Appliquons le premier **principe industriel** à un échangeur simple flux :

- son **travail indiqué massique** est $w_i = 0$ car il n'y a pas de pièce mobile
- son **transfert thermique massique** est q non nul.

Il vient que

Quelques composants des installations industrielles

Échangeur thermique

Appliquons le premier **principe industriel** à un échangeur simple flux :

- son **travail indiqué massique** est $w_i = 0$ car il n'y a pas de pièce mobile
- son **transfert thermique massique** est q non nul.
- ses variations d'énergies cinétique et potentielle sont négligeables devant les variations d'enthalpie. ❤️

Il vient que

Quelques composants des installations industrielles

Échangeur thermique

Appliquons le premier **principe industriel** à un échangeur simple flux :

- son **travail indiqué massique** est $w_i = 0$ car il n'y a pas de pièce mobile
- son **transfert thermique massique** est q non nul.
- ses variations d'énergies cinétique et potentielle sont négligeables devant les variations d'enthalpie. ❤️

Il vient que

Quelques composants des installations industrielles

Échangeur thermique

Appliquons le premier **principe industriel** à un échangeur simple flux :

- son **travail indiqué massique** est $w_i = 0$ car il n'y a pas de pièce mobile
- son **transfert thermique massique** est q non nul.
- ses variations d'énergies cinétique et potentielle sont négligeables devant les variations d'enthalpie. ❤

Il vient que

$$\left(h_s + \frac{1}{2}V_s^2 + gz_s \right) - \left(h_e + \frac{1}{2}V_e^2 + gz_e \right) = q + w_i$$

Quelques composants des installations industrielles

Échangeur thermique

Appliquons le premier **principe industriel** à un échangeur simple flux :

- son **travail indiqué massique** est $w_i = 0$ car il n'y a pas de pièce mobile
- son **transfert thermique massique** est q non nul.
- ses variations d'énergies cinétique et potentielle sont négligeables devant les variations d'enthalpie. ❤

Il vient que

$$\left(h_s + \frac{1}{2} V_s^2 + g z_s \right) - \left(h_e + \frac{1}{2} V_e^2 + g z_e \right) = q + w_i$$

$$h_s - h_e = q \quad \text{ou} \quad D_m (h_s - h_e) = \mathcal{P}_{th} \quad \text{❤}$$

pour un échangeur simple flux pour lequel les variations d'énergies cinétique et potentielle sont négligeables.

Quelques composants des installations industrielles

Échangeur thermique

Appliquons le premier **principe industriel** à un échangeur double flux :

Il vient que

Quelques composants des installations industrielles

Échangeur thermique

Appliquons le premier **principe industriel** à un échangeur double flux :

- le **travail indiqué massique** pour les deux fluides est nul car pas de pièce mobile

Il vient que

Quelques composants des installations industrielles

Échangeur thermique

Appliquons le premier **principe industriel** à un échangeur double flux :

- le **travail indiqué massique** pour les deux fluides est nul car pas de pièce mobile
- le fluide 1 reçoit la puissance thermique $\mathcal{P}_{2 \rightarrow 1}$ de la part du fluide 2, et le fluide 2 reçoit la puissance thermique $\mathcal{P}_{1 \rightarrow 2}$ de la part du fluide 1. Il s'agit de la même puissance thermique orientée différemment, soit $\mathcal{P}_{2 \rightarrow 1} = -\mathcal{P}_{1 \rightarrow 2} = \mathcal{P}_{\text{int}}$. On néglige les échanges thermiques entre les fluides et l'extérieur en considérant l'échangeur **calorifugé**.

Il vient que

Quelques composants des installations industrielles

Échangeur thermique

Appliquons le premier **principe industriel** à un échangeur double flux :

- le **travail indiqué massique** pour les deux fluides est nul car pas de pièce mobile
- le fluide 1 reçoit la puissance thermique $\mathcal{P}_{2 \rightarrow 1}$ de la part du fluide 2, et le fluide 2 reçoit la puissance thermique $\mathcal{P}_{1 \rightarrow 2}$ de la part du fluide 1. Il s'agit de la même puissance thermique orientée différemment, soit $\mathcal{P}_{2 \rightarrow 1} = -\mathcal{P}_{1 \rightarrow 2} = \mathcal{P}_{\text{int}}$. On néglige les échanges thermiques entre les fluides et l'extérieur en considérant l'échangeur **calorifugé**.
- Les variations d'énergies cinétique et potentielle des deux fluides sont négligeables devant les variations d'enthalpie.

Il vient que

Quelques composants des installations industrielles

Échangeur thermique

Appliquons le premier **principe industriel** à un échangeur double flux :

- le **travail indiqué massique** pour les deux fluides est nul car pas de pièce mobile
- le fluide 1 reçoit la puissance thermique $\mathcal{P}_{2 \rightarrow 1}$ de la part du fluide 2, et le fluide 2 reçoit la puissance thermique $\mathcal{P}_{1 \rightarrow 2}$ de la part du fluide 1. Il s'agit de la même puissance thermique orientée différemment, soit $\mathcal{P}_{2 \rightarrow 1} = -\mathcal{P}_{1 \rightarrow 2} = \mathcal{P}_{\text{int}}$. On néglige les échanges thermiques entre les fluides et l'extérieur en considérant l'échangeur **calorifugé**.
- Les variations d'énergies cinétique et potentielle des deux fluides sont négligeables devant les variations d'enthalpie.

Il vient que

$$D_m \left(h_s + \frac{1}{2} V_s^2 + g z_s \right) - \left(h_e + \frac{1}{2} V_e^2 + g z_e \right) = \mathcal{P}_{th} + \mathcal{P}_i$$

Quelques composants des installations industrielles

Échangeur thermique

Appliquons le premier **principe industriel** à un échangeur double flux :

- le **travail indiqué massique** pour les deux fluides est nul car pas de pièce mobile
- le fluide 1 reçoit la puissance thermique $\mathcal{P}_{2 \rightarrow 1}$ de la part du fluide 2, et le fluide 2 reçoit la puissance thermique $\mathcal{P}_{1 \rightarrow 2}$ de la part du fluide 1. Il s'agit de la même puissance thermique orientée différemment, soit $\mathcal{P}_{2 \rightarrow 1} = -\mathcal{P}_{1 \rightarrow 2} = \mathcal{P}_{\text{int}}$. On néglige les échanges thermiques entre les fluides et l'extérieur en considérant l'échangeur **calorifugé**.
- Les variations d'énergies cinétique et potentielle des deux fluides sont négligeables devant les variations d'enthalpie.

Il vient que

$$D_{m1} (h_{1s} - h_{1e}) = \mathcal{P}_{2 \rightarrow 1} = \mathcal{P}_{\text{int}}$$

$$D_{m2} (h_{2s} - h_{2e}) = \mathcal{P}_{1 \rightarrow 2} = -\mathcal{P}_{\text{int}}$$

$$D_{m1} (h_{1s} - h_{1e}) + D_{m2} (h_{2s} - h_{2e}) = 0.$$



Plan

- 1 Introduction
- 2 Approche globale
 - Sens des échanges d'énergie dans une machine ditherme
 - Performance
- 3 Principes de la thermodynamiques pour un fluide en écoulement
 - Du système ouvert à un système fermé
 - Bilan d'énergie : premier principe pour le système ouvert
 - Bilan d'entropie : deuxième principe pour le système ouvert
- 4 Quelques composants des installations industrielles
 - Détendeur
 - Compresseur, pompe et turbine
 - Échangeur thermique
- 5 Application à la pompe à chaleur air-eau
 - Structure
 - Étude du cycle sur le diagramme des frigoristes
 - Coefficient de performance

Application à la pompe à chaleur air-eau

Structure

La **pompe à chaleur** (ou PAC) est une machine thermique ditherme à écoulement dans laquelle un fluide caloporteur parcourt un circuit hydraulique où il subit des changements d'état.

La PAC permet de chauffer à 40°C un plancher chauffant alors que la température extérieure est de l'ordre 0°C . On nomme ce type de pompe à chaleur des "PAC air-eau" car **la source froide est l'air extérieur** et **la source chaude est l'eau chaude** du circuit de chauffage.

Les transferts d'énergie sont tels que

$$Q_c \quad ; \quad Q_f \quad ; \quad W \quad .$$

L'énergie intéressante est et l'énergie coûteuse est . L'efficacité est donc $e =$.

Nous allons étudier comme système le **fluide caloporteur** R32.

Application à la pompe à chaleur air-eau

Structure

La **pompe à chaleur** (ou PAC) est une machine thermique ditherme à écoulement dans laquelle un fluide caloporteur parcourt un circuit hydraulique où il subit des changements d'état.

La PAC permet de chauffer à 40°C un plancher chauffant alors que la température extérieure est de l'ordre 0°C . On nomme ce type de pompe à chaleur des "PAC air-eau" car **la source froide est l'air extérieur** et **la source chaude est l'eau chaude** du circuit de chauffage.

Les transferts d'énergie sont tels que

$$Q_c < 0 \quad ; \quad Q_f > 0 \quad ; \quad W > 0.$$

L'énergie intéressante est et l'énergie coûteuse est . L'efficacité est donc $e =$.

Nous allons étudier comme système le **fluide caloporteur** R32.

Application à la pompe à chaleur air-eau

Structure

La **pompe à chaleur** (ou PAC) est une machine thermique ditherme à écoulement dans laquelle un fluide caloporteur parcourt un circuit hydraulique où il subit des changements d'état.

La PAC permet de chauffer à 40°C un plancher chauffant alors que la température extérieure est de l'ordre 0°C . On nomme ce type de pompe à chaleur des "PAC air-eau" car **la source froide est l'air extérieur** et **la source chaude est l'eau chaude** du circuit de chauffage.

Les transferts d'énergie sont tels que

$$Q_c < 0 \quad ; \quad Q_f > 0 \quad ; \quad W > 0.$$

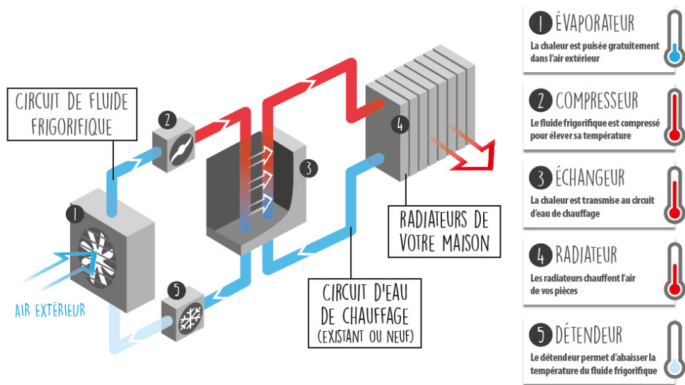
L'énergie intéressante est Q_c et l'énergie coûteuse est W . L'efficacité est donc $e = -Q_c/W$.

Nous allons étudier comme système le **fluide caloporteur** R32.

Application à la pompe à chaleur air-eau

Structure

Afin de réchauffer la source chaude, le fluide doit être plus chaud que la source chaude. Afin de refroidir la source froide, le fluide doit être plus froid que la source froide. Donc **il faut faire varier la température du fluide sans transfert thermique par compression ou détente adiabatiques** à l'aide d'un travail $W > 0$.

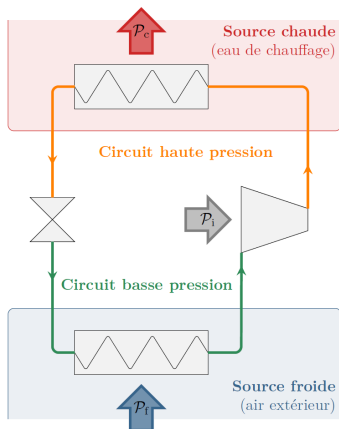


Application à la pompe à chaleur air-eau

Structure

Une PAC est généralement composée de 4 éléments.

- Afin que le fluide soit plus chaud que la source chaude, un **compresseur augmente la pression et la température** du fluide et le met en circulation.

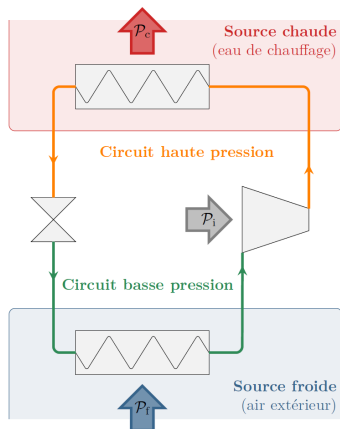


Application à la pompe à chaleur air-eau

Structure

Une PAC est généralement composée de 4 éléments.

- Afin que le fluide soit plus chaud que la source chaude, un **compresseur augmente la pression et la température** du fluide et le met en circulation.
- Le fluide, sous forme gaz, passe par un échangeur thermique simple flux en contact avec la source chaude. Comme il se refroidit et passe sous forme liquide, on nomme cet élément **condenseur**.

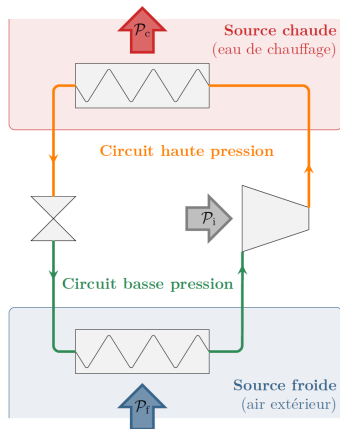


Application à la pompe à chaleur air-eau

Structure

Une PAC est généralement composée de 4 éléments.

- Il faut diminuer la température du fluide sous forme liquide afin qu'il soit plus froid que la source froide.
Un détendeur diminue la pression et la température du fluide.

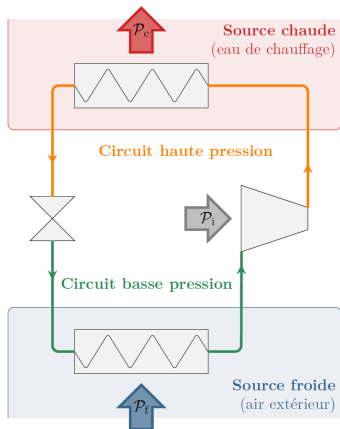


Application à la pompe à chaleur air-eau

Structure

Une PAC est généralement composée de 4 éléments.

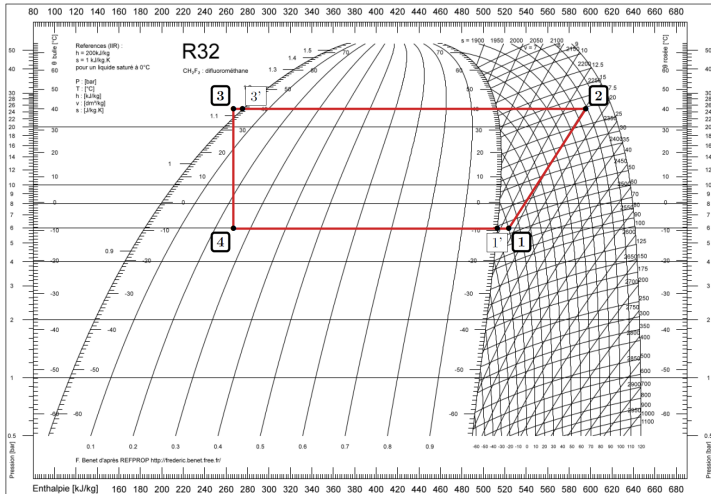
- Il faut diminuer la température du fluide sous forme liquide afin qu'il soit plus froid que la source froide.
Un détendeur diminue la pression et la température du fluide.
- Le fluide, sous forme liquide, passe par un échangeur thermique simple flux en contact avec la source froide. Comme il se réchauffe et passe sous forme gaz, on nomme cet élément **évaporateur**.



Application à la pompe à chaleur air-eau

Étude du cycle sur le diagramme des frigorigères

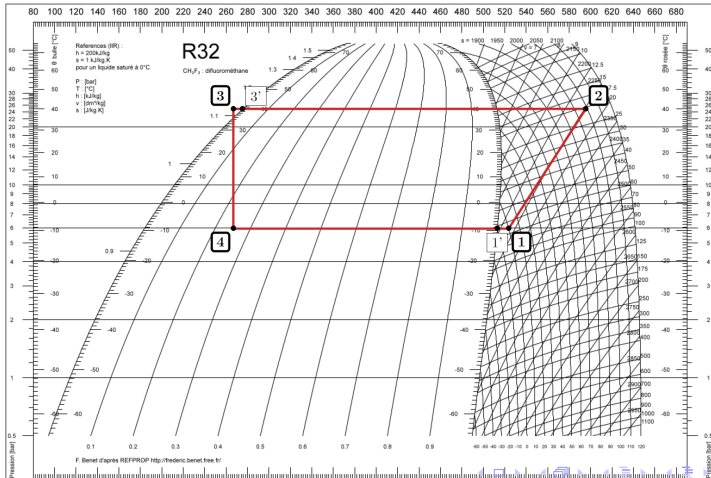
De l'étape 1 à 2, le fluide sous forme gaz voit sa pression augmenter de 6 bar à 25 bar et sa température de 0 °C à 100 °C : il s'agit du passage par le **compresseur** : $h_2 - h_1 = w_{ic} > 0$.



Application à la pompe à chaleur air-eau

Étude du cycle sur le diagramme des frigorigères

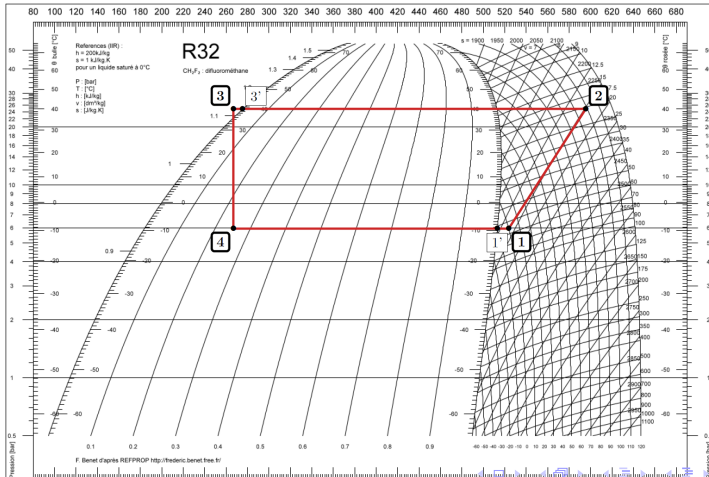
De l'étape 2 à 3, le fluide subit une transformation isobare durant laquelle sa température diminue de 100 °C à 40 °C en passant de gaz à **liquide limite saturant** : il s'agit du passage par **le condenseur en contact avec la source chaude** : $h_3 - h_2 = q_{cond} = q_c < 0$.



Application à la pompe à chaleur air-eau

Étude du cycle sur le diagramme des frigorigères

De l'étape 3 à 4, le fluide, qui repasse en mélange liquide-vapeur, subit une transformation isenthalpique durant laquelle sa température diminue de 40°C à -10°C et sa pression de 25 bar à 6 bar : il s'agit du passage par le **détendeur** : $h_4 - h_3 = 0$.

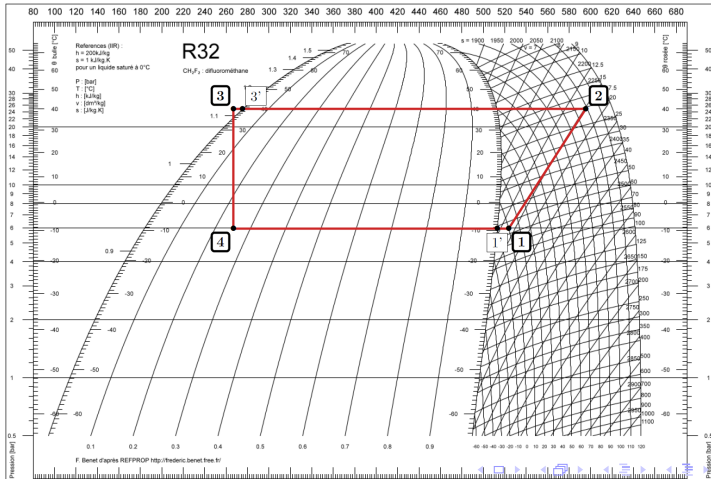


Application à la pompe à chaleur air-eau

Étude du cycle sur le diagramme des frigorigères

De l'étape 3 à 4, le fluide subit une transformation isobare durant laquelle sa température augmente de -10°C à 0°C en passant de liquide à gaze : s'agit du passage par **l'évaporateur en contact avec la source froide** :

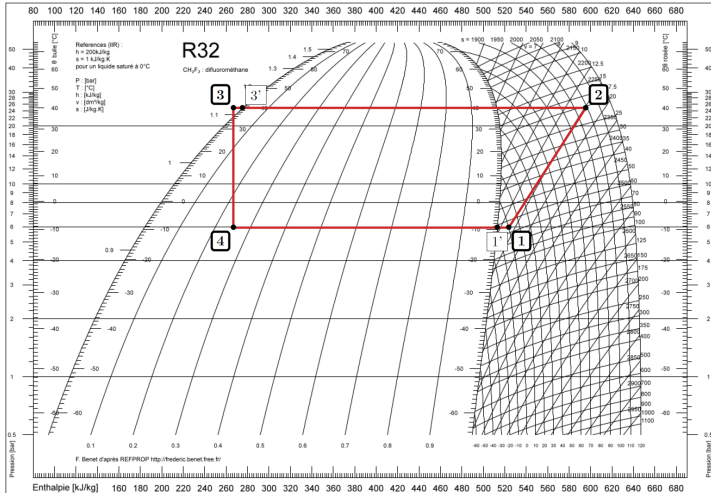
$$h_1 - h_4 = q_{eva} = q_f > 0.$$



Application à la pompe à chaleur air-eau

Étude du cycle sur le diagramme des frigorigères

Le cycle est parcouru dans le sens trigonométrique c'est donc un **cycle récepteur** : $W > 0$.



Application à la pompe à chaleur air-eau

Coefficient de performance

D'après la définition de l'efficacité de la PAC, il vient que

$$e =$$

Application à la pompe à chaleur air-eau

Coefficient de performance

D'après la définition de l'efficacité de la PAC, il vient que

$$e = -\frac{Q_c}{W} = -\frac{q_c}{w} = -\frac{q_{cond}}{w_{ic}} = \frac{h_2 - h_3}{h_2 - h_1} \simeq \frac{600 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} - 270 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}}{600 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} - 520 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}} = 4.$$

Application à la pompe à chaleur air-eau

Coefficient de performance

D'après la définition de l'efficacité de la PAC, il vient que

$$e = -\frac{Q_c}{W} = -\frac{q_c}{w} = -\frac{q_{cond}}{w_{ic}} = \frac{h_2 - h_3}{h_2 - h_1} \simeq \frac{600 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} - 270 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}}{600 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} - 520 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}} = 4.$$

On compare à l'efficacité de Carnot en utilisant les données du diagrammes

$$e_C = \frac{T_c}{T_c - T_f} = \frac{273 + 40}{40 - 0} = 8$$

Les températures des sources chaude et froide correspondent à aux isothermes de changement d'état du fluide au niveau des échangeurs thermiques.

On voit bien que $e_C > e$. L'écart provient des irréversibilités à chacune des étapes du cycle.