

# THERMODYNAMIQUE DES SYSTÈMES OUVERTS

Lycée Henri Poincaré, Classe de PC\*

## Definition

Système fermé : n'échange pas de matière avec l'extérieur

Système ouvert : échange de la matière avec l'extérieur

# THERMODYNAMIQUE DES SYSTÈMES OUVERTS

Lycée Henri Poincaré, Classe de PC\*

## Definition

Système fermé : n'échange pas de matière avec l'extérieur

Système ouvert : échange de la matière avec l'extérieur

## 1 Premier principe

- a. Énoncé
- b. Énergie interne du gaz parfait
- c. Exemples

## 1 Premier principe

### a. Énoncé

Pour tout système thermodynamique fermé, il existe une fonction d'état extensive  $U$  appelée énergie interne telle que, lorsque le système évolue d'un état  $\mathcal{E}_1$  à un état  $\mathcal{E}_2$ , la variation de  $U$  s'exprime par

$$\Delta U = U(\mathcal{E}_2) - U(\mathcal{E}_1) = W + Q \quad .$$

Plus généralement

$$\Delta U + \Delta E_m = U(\mathcal{E}_2) + E_m(\mathcal{E}_2) - (U(\mathcal{E}_1) + E_m(\mathcal{E}_1)) = W + Q$$

b. Énergie interne du gaz parfait

c. Exemples

## 1 Premier principe

- a. Énoncé
- b. Énergie interne du gaz parfait
- c. Exemples

## 1 Premier principe

- a. Énoncé
- b. Énergie interne du gaz parfait
- c. Exemples

## 1 Premier principe

- a. Énoncé
- b. Énergie interne du gaz parfait
- c. Exemples

### Ex 1 : compression d'un gaz de Van der Waals.

Une quantité de 10 moles de  $\text{CO}_2$  est comprimée de manière isotherme et mécaniquement réversible, à  $T = 298 \text{ K}$ , du volume  $V_1 = 10 \text{ L}$  jusqu'au volume  $V_2 = 1 \text{ L}$ . On adopte le modèle du gaz de Van der Waals dont l'équation d'état s'écrit, pour une seule mole,

$$\left(P + \frac{a}{V^2}\right) (V - b) = RT \quad .$$

Calculer le travail reçu par le gaz et le transfert thermique depuis le thermostat. On donne  $a = 0,36 \text{ J.mol}^{-2}.\text{m}^3$ ,  $b = 4,3.10^{-5} \text{ m}^3.\text{mol}^{-1}$ . Énergie interne du gaz de Van der Waals :  $U = nC_{vm}T - an^2/V$ .

## 1 Premier principe

- a. Énoncé
- b. Énergie interne du gaz parfait
- c. Exemples

### Ex 2 : Entrée d'air dans un ballon

Un ballon en verre préalablement vidé est muni d'un robinet communiquant avec l'air ambiant, de température  $T_0$ . On ouvre momentanément le robinet puis on le referme. Trouver la température de l'air après son entrée dans le ballon.

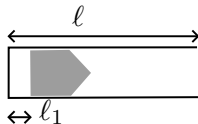


**I** Premier principe

- a. Énoncé
- b. Énergie interne du gaz parfait
- c. Exemples

**Ex 3 : propulsion d'un obus**

Un obus de masse  $m = 1 \text{ kg}$  se trouve dans un canon de section  $S$  et de longueur  $\ell_2 = 1$ . La combustion de la poudre, quasi-instantanée, produit  $n = 10$  moles de gaz parfait diatomique à la température  $T_1 = 1500 \text{ K}$ , dans une section de longueur  $\ell_1 = 5, \text{ cm}$  au fond du canon. Quand l'obut atteint l'extrémité du canon, la température des gaz est  $T_2$ . Trouver à cet instant la vitesse de l'obus.



- 2 Enthalpie
- 3 Second principe
- 4 Efficacité des machines thermiques

- 2 Enthalpie
- 3 Second principe
- 4 Efficacité des machines thermiques

- 2 Enthalpie
- 3 Second principe
- 4 Efficacité des machines thermiques

## 2 Enthalpie

- a) Définition et propriété
- b) Enthalpie du gaz parfait
- c) Enthalpie d'une phase condensée idéale

## 3 Second principe

## 4 Efficacité des machines thermiques

## 2 Enthalpie

### a) Définition et propriété

b) Enthalpie du gaz parfait

c) Enthalpie d'une phase condensée idéale

## 3 Second principe

## 4 Efficacité des machines thermiques

## 2 Enthalpie

a) Définition et propriété

b) Enthalpie du gaz parfait

c) Enthalpie d'une phase condensée idéale

## 3 Second principe

## 4 Efficacité des machines thermiques

## 2 Enthalpie

- a) Définition et propriété
- b) Enthalpie du gaz parfait
- c) Enthalpie d'une phase condensée idéale

## 3 Second principe

## 4 Efficacité des machines thermiques



## 2 Enthalpie

## 3 Second principe

a. Énoncé

b. Identité thermodynamique et entropie des systèmes modèles

c. Exemple de phénomènes irréversibles

## 4 Efficacité des machines thermiques

**2** Enthalpie**3** Second principe**a.** Énoncé

Pour tout système thermodynamique fermé, il existe une fonction d'état extensive  $S$  appelée entropie telle que, lorsque le système évolue d'un état  $\mathcal{E}_1$  à un état  $\mathcal{E}_2$ , la variation de  $S$  s'exprime par

$$\Delta S = S(\mathcal{E}_2) - S(\mathcal{E}_1) = S_e + S_c$$

où

$$S_e = \frac{Q}{T_e} \quad T_e \text{ température d'échange}$$

$$S_c \geq 0 \quad S_c = 0 \text{ pour une transformation réversible.}$$

**b.** Identité thermodynamique et entropie des systèmes modèles

**c.** Exemple de phénomènes irréversibles

**4** Efficacité des machines thermiques

## 2 Enthalpie

## 3 Second principe

a. Énoncé

b. Identité thermodynamique et entropie des systèmes modèles

c. Exemple de phénomènes irréversibles

## 4 Efficacité des machines thermiques

## 2 Enthalpie

## 3 Second principe

a. Énoncé

b. Identité thermodynamique et entropie des systèmes modèles

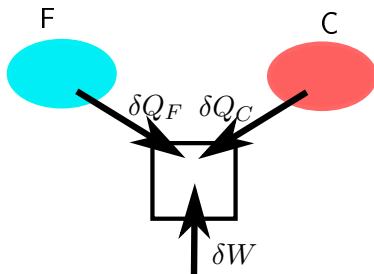
c. Exemple de phénomènes irréversibles

## 4 Efficacité des machines thermiques

- 2 Enthalpie
- 3 Second principe
- 4 Efficacité des machines thermiques

- 2 Enthalpie
- 3 Second principe
- 4 Efficacité des machines thermiques

Ex : Un climatiseur de puissance électrique  $P = 2,5 \text{ kW}$  refroidit une pièce de capacité calorifique  $C$  depuis la température  $T_i$ , égale à la température extérieure  $T_2 = 35^\circ\text{C}$ , jusqu'à la température  $T_f = 25^\circ\text{C}$ . Trouver une borne inférieure du temps nécessaire pour cela.

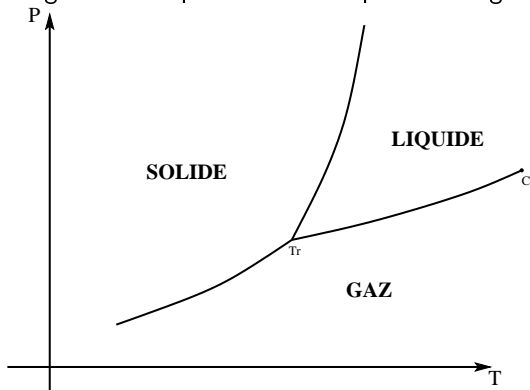


## 5 Changements d'état des corps pur

- a) Diagramme d'équilibre et enthalpie de changement d'état
- b) Équilibre liquide-vapeur

## 5 Changements d'état des corps pur

### a) Diagramme d'équilibre et enthalpie de changement d'état



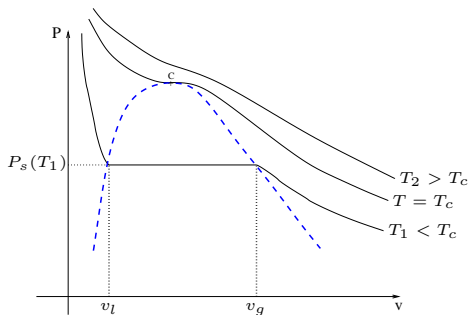
### b) Équilibre liquide-vapeur



## 5 Changements d'état des corps pur

- a) Diagramme d'équilibre et enthalpie de changement d'état
- b) Équilibre liquide-vapeur

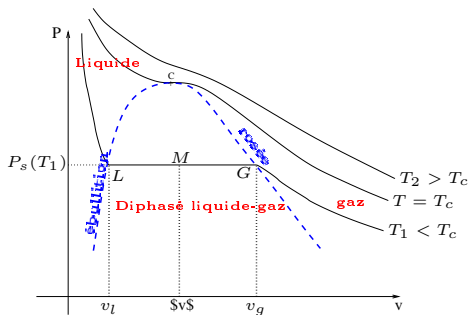
Figure – Diagramme de Clapeyron d'un corps pur



## 5 Changements d'état des corps pur

- a) Diagramme d'équilibre et enthalpie de changement d'état
- b) Équilibre liquide-vapeur

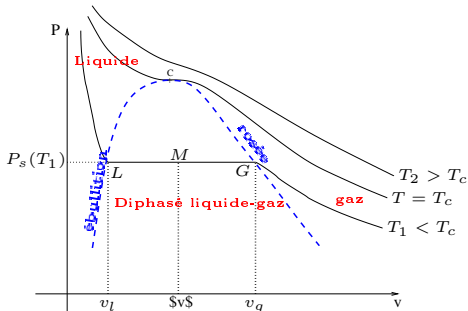
Figure – Diagramme de Clapeyron d'un corps pur



## 5 Changements d'état des corps pur

- a) Diagramme d'équilibre et enthalpie de changement d'état
- b) Équilibre liquide-vapeur

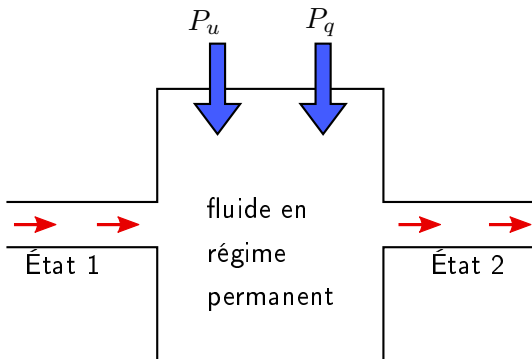
Figure – Diagramme de Clapeyron d'un corps pur



Ex : on porte 10 kg d'eau à  $300^\circ\text{C}$  dans un volume  $V = 10\text{ L}$ .  
 À cette température, on donne  $v_g = 22\text{ L.kg}^{-1}$  et  
 $v_l = 1,4\text{ L.kg}^{-1}$ . Trouver les masses de liquide et de vapeur.

- Cadre d'étude
- Premier principe « industriel »
- Exemples
- Cas des systèmes présentant plusieurs entrées et/ou plusieurs sorties

## 1 Cadre d'étude

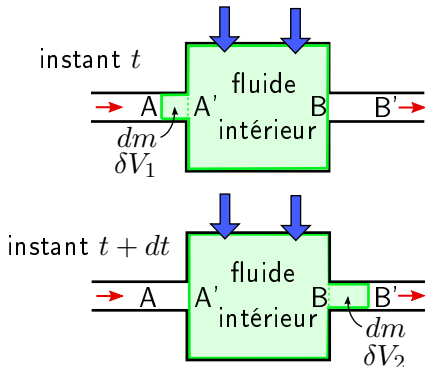


2 Premier principe « industriel »

3 Exemples

4 Cas des systèmes présentant plusieurs entrées et/ou plusieurs sorties

- 1 Cadre d'étude
- 2 Premier principe « industriel »



- 3 Exemples
- 4 Cas des systèmes présentant plusieurs entrées et/ou plusieurs sorties

- 1 Cadre d'étude
- 2 Premier principe « industriel »

### Premier principe « industriel »

$$\Delta(h + e_m) = w_u + q \qquad D_m \Delta(h + e_m) = \mathcal{P}_u + \mathcal{P}_Q$$

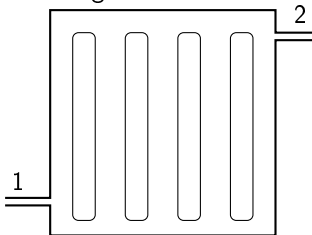
- 3 Exemples
- 4 Cas des systèmes présentant plusieurs entrées et/ou plusieurs sorties

- 1 Cadre d'étude
- 2 Premier principe « industriel »
- 3 Exemples
  - a. Chauffage central
  - b. Compresseur
  - c. Turbine motrice à gaz
  - d. Détente de Joule-Thomson
  - e. Tuyère
- 4 Cas des systèmes présentant plusieurs entrées et/ou plusieurs sorties



- 1 Cadre d'étude
- 2 Premier principe « industriel »
- 3 Exemples

a. Chauffage central

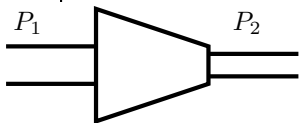


- b. Compresseur
  - c. Turbine motrice à gaz
  - d. Détente de Joule-Thomson
  - e. Tuyère
- 4 Cas des systèmes présentant plusieurs entrées et/ou plusieurs sorties

- 1 Cadre d'étude
- 2 Premier principe « industriel »
- 3 Exemples

a. Chauffage central

b. Compresseur



c. Turbine motrice à gaz

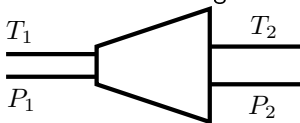
d. Détente de Joule-Thomson

e. Tuyère

- 4 Cas des systèmes présentant plusieurs entrées et/ou plusieurs sorties

- 1 Cadre d'étude
- 2 Premier principe « industriel »
- 3 Exemples

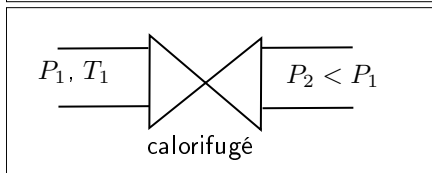
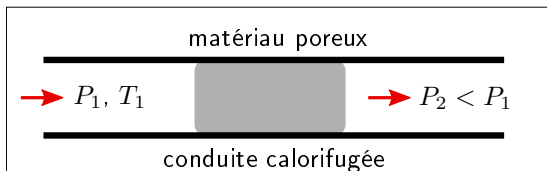
- a. Chauffage central
- b. Compresseur
- c. Turbine motrice à gaz



- d. Détente de Joule-Thomson
- e. Tuyère

- 4 Cas des systèmes présentant plusieurs entrées et/ou plusieurs sorties

- 1 Cadre d'étude
- 2 Premier principe « industriel »
- 3 Exemples
  - a. Chauffage central
  - b. Compresseur
  - c. Turbine motrice à gaz
  - d. Détente de Joule-Thomson



- 1 Cadre d'étude
- 2 Premier principe « industriel »
- 3 Exemples
  - a. Chauffage central
  - b. Compresseur
  - c. Turbine motrice à gaz
  - d. Détente de Joule-Thomson
    - ▶ Ouvrir le diagramme  $(T, s)$  de l'hélium
  - e. Tuyère
- 4 Cas des systèmes présentant plusieurs entrées et/ou plusieurs sorties

- 1 Cadre d'étude
- 2 Premier principe « industriel »
- 3 Exemples
  - a. Chauffage central
  - b. Compresseur
  - c. Turbine motrice à gaz
  - d. Détente de Joule-Thomson
  - e. Tuyère
- 4 Cas des systèmes présentant plusieurs entrées et/ou plusieurs sorties

- 1 Cadre d'étude
- 2 Premier principe « industriel »
- 3 Exemples
  - a. Chauffage central
  - b. Compresseur
  - c. Turbine motrice à gaz
  - d. Détente de Joule-Thomson
  - e. Tuyère
- 4 Cas des systèmes présentant plusieurs entrées et/ou plusieurs sorties

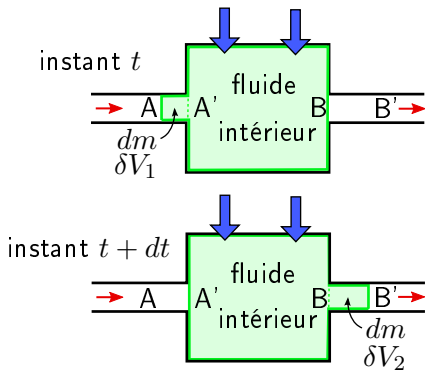
## 1 Second principe « industriel »

## 2 Exemples

- Chauffage central
- Compresseur
- Détente de Joule et Thomson



## 1 Second principe « industriel »



## 2 Exemples

- Chauffage central
- Compresseur
- Détente de Joule et Thomson

## 1 Second principe « industriel »

## 2 Exemples

- a) Chauffage central
- b) Compresseur
- c) Détente de Joule et Thomson

- 1 Second principe « industriel »
- 2 Exemples
  - a) Chauffage central
  - b) Compresseur
  - c) Détente de Joule et Thomson

- 1 Second principe « industriel »
- 2 Exemples
  - a) Chauffage central
  - b) Compresseur
  - c) Détente de Joule et Thomson

- 1 Second principe « industriel »
  - 2 Exemples
    - a) Chauffage central
    - b) Compresseur
    - c) Détente de Joule et Thomson
- ▶ Ouvrir le diagramme  $(T, s)$  de l'hélium

## 1 Cycle de Rankine

## 1 Cycle de Rankine

## 1 Cycle de Rankine

**A** : liquide saturant à  $T_1$

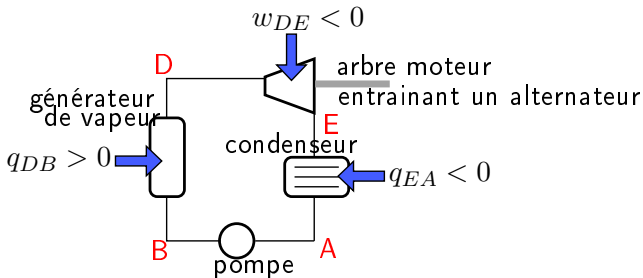
**AB** : compression ad. rév.  $p_1 \rightarrow p_2$

**BC** : échauffement isobare du liquide jusqu'à saturation

**CD** : vaporisation isobare totale

**DE** : détente ad. rév. dans la turbine  $p_2 \rightarrow p_1$

**EA** : liquéfaction totale sous pression  $p_1$





## 1 Cycle de Rankine

**A** : liquide saturant à  $T_1$

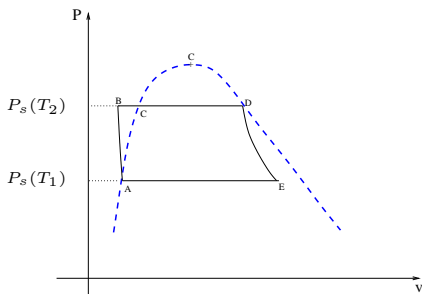
**AB** : compression ad. rév.  $p_1 \rightarrow p_2$

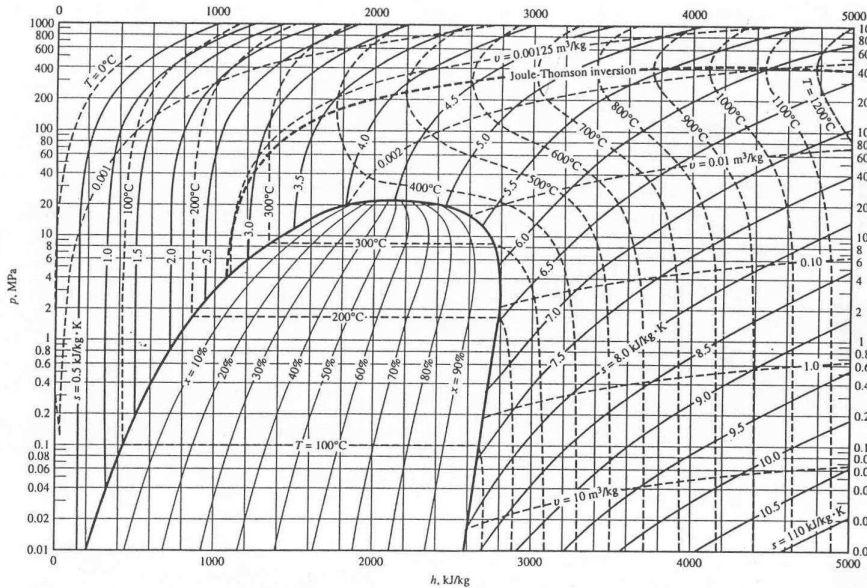
**BC** : échauffement isobare du liquide jusqu'à saturation

**CD** : vaporisation isobare totale

**DE** : détente ad. rév. dans la turbine  $p_2 \rightarrow p_1$

**EA** : liquéfaction totale sous pression  $p_1$

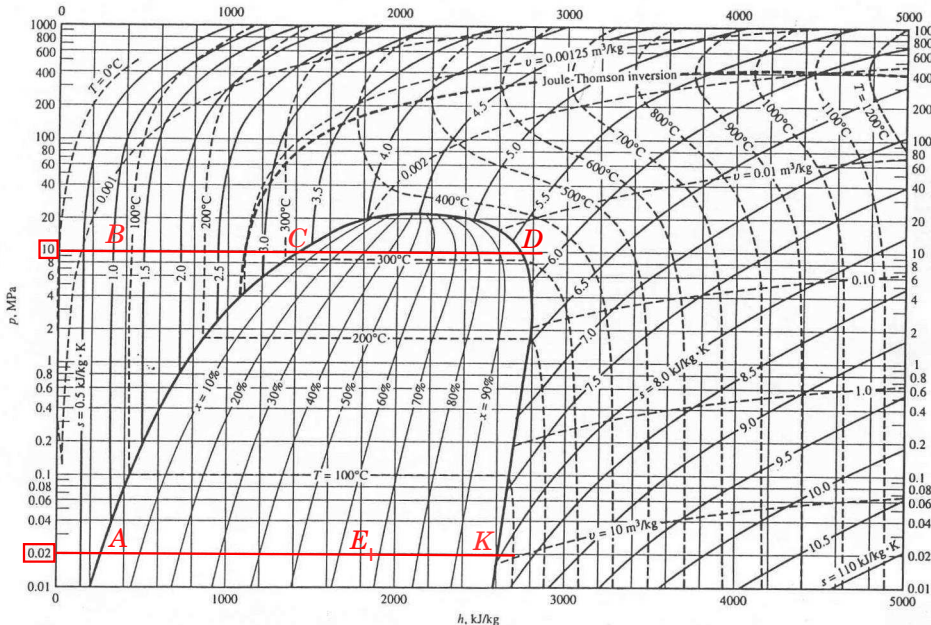




► Ouvrir le diagramme ( $h, P$ ) de l'eau

► Ouvrir le diagramme ( $T - s$ ) de l'eau

À vous de jouer !



$T$	$h_L$ (kJ/kg)	$s_L$ (kJ/kg/K)	$h_v$ (kJ/kg)	$s_v$ (kJ/kg/K)
$T_1 =$				
$T_2 =$				

$T$	$h_L$ (kJ/kg)	$s_L$ (kJ/kg/K)	$h_v$ (kJ/kg)	$s_v$ (kJ/kg/K)
$T_1 = 333 \text{ K}$	$A \quad 250$	$A \quad 0,84$	$K \quad 2600$	$K \quad 7,88$
$T_2 = 583 \text{ K}$	$C \quad 1400$	$C \quad 3,40$	$D \quad 2750$	$D \quad 5,64$

## 2 Pompe à chaleur

## 2 Pompe à chaleur

**A** : gaz à  $T_A = 5^{\circ}\text{C}$ ,  $P_A = P_1 = 3\text{ bar}$

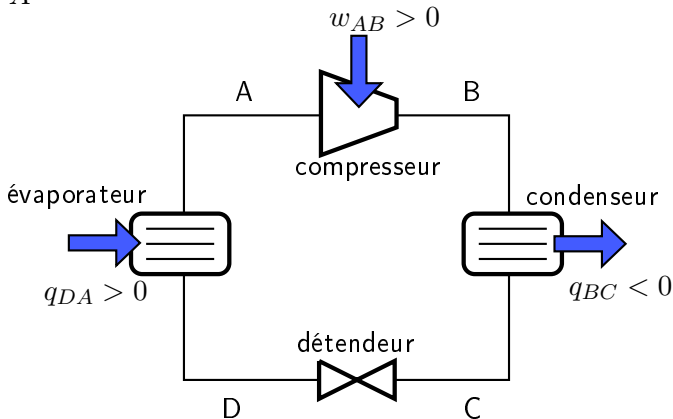
**AB** : compression ad. rév.  $p_1 \rightarrow p_2 = 10\text{ bar}$

**BC** : condensation isobare jusqu'au liquide saturant

**CD** : détente de type JT jusqu'à la pression  $P_1$

**DA** : évaporation et échauffement isobare pour revenir à l'état

**A**





## 2 Pompe à chaleur

► Diagramme de Mollier du fluide R134a avec le cycle

	<i>A</i>	<i>B</i>	<i>C</i>	<i>D</i>
$T$ ( $^{\circ}\text{C}$ )				
$h$ ( $\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$ )				
$s$ ( $\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ )				

2 Pompe à chaleur

	<i>A</i>	<i>B</i>	<i>C</i>	<i>D</i>
$T$ (°C)	5	47	39	1
$h$ (kJ.kg <sup>-1</sup> )	400	425	255	255
$s$ (kJ.kg <sup>-1</sup> .K <sup>-1</sup> )	1,74	1,74	1,19	1,20